

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

СЕМЬЯ СОЛНЦА

Ф.Л.УИПЛ



F.L.WHIPPLE

ORBITING THE SUN

**PLANETS
AND SATELLITES
OF THE SOLAR
SYSTEM**

Harvard University Press
Cambridge, Massachusetts
London, England 1981

Ф.Л.УИПЛ

СЕМЬЯ СОЛНЦА

ПЛАНЕТЫ И СПУТНИКИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Перевод с английского
Ю.И.Ефремова

Под редакцией
д-ра физ.-мат. наук,
проф. М.Я.Марова

МОСКВА "МИР" 1984

ББК 22.65
У 38
УДК 523.4

Уипл Ф. Л.

У 38 Семья Солнца: Планеты и спутники Солнечной системы: Пер. с англ. Ю. И. Ефремова/Под ред. и с предисл. д-ра физ.-мат. наук, проф. М. Я. Марова.— М.: Мир, 1984.— 316 с., ил.

Кольца Юпитера и Урана, горы, вдвое выше Эвереста на Марсе, грозы и облака из капелек серной кислоты на Венере, действующие вулканы на Ио, океаны жидкого азота на Титане. С этими и другими удивительными открытиями, сделанными с помощью космических аппаратов и интенсивных наземных наблюдений, знакомит книга выдающегося американского астрофизика.

Для широких кругов читателей со средним образованием, желающих познакомиться с достижениями современной науки.

У $\frac{1705050000-186}{041(01)-84}$ 89-84, ч. 1

ББК 22.65
526

*Редакция литературы по космическим исследованиям, астрономии
и геофизике*

© 1941, 1963, 1968, 1981 by the President
and Fellows of Harvard College

© Перевод на русский язык, «Мир», 1984

От редактора перевода

В наше время происходит двуединый процесс специализации и интеграции науки. Это хорошо видно на примере изучения Солнечной системы. Межпланетное пространство и все небесные тела от самых близких, таких, как наш естественный спутник Луна, до самых далеких, таких, как планеты-гиганты со своими системами спутников, кометы и астероиды, уже больше не находятся в ведении одних лишь астрономов, а привлекают все большее внимание геофизиков, геохимиков, геологов, метеорологов — практически всех специалистов, занимающихся изучением Земли. В результате такого комплексного изучения Солнечной системы родилась новая область науки — сравнительная планетология.

Новую эпоху в исследованиях Солнечной системы открыл запуск 1-го советского искусственного спутника Земли 4 октября 1957 г. С тех пор советские и американские космические аппараты принесли много принципиально новой информации о наших космических соседях, о бесконечном разнообразии условий на планетах и спутниках, об общих закономерностях, лежащих в основе их формирования. Была сфотографирована обратная сторона Луны, доставлены на Землю образцы лунного грунта, переданы крупномасштабные изображения планет и их спутников, исследованы свойства поверхностей и атмосфер. Нигде в Солнечной системе не было обнаружено признаков жизни, даже самой примитивной.

О результатах этих удивительных исследований повествует книга выдающегося американского астронома Фреда Уиппла, посвятившего всю свою жизнь исследованиям Солнечной системы. Эта книга представляет собой полностью переработанный вариант его книги «Земля, Луна и планеты», первое издание которой вышло в свет в 1941 г., так как за прошедшие 40 лет знания о Солнечной системе неизмеримо выросли. Автор охватывает широкий круг вопросов: от законов движения планет и спутников и особенностей их физико-химической природы до проблемы происхождения и эволюции Солнечной системы. Он не ограничивается простым описанием установленных фактов, а излагает

их в логической последовательности, сопоставляя друг с другом.

Так, оказалось, что соседние с Землей планеты и ее спутник Луна имеют много общего, но при этом каждое небесное тело шло своим путем развития, который обусловлен расстоянием планеты от Солнца, ее массой и размерами, относительным содержанием элементов на начальной стадии образования из протопланетной туманности. Поэтому изучение планет земной группы позволяет лучше понять, как возник и развился сложный комплекс природных процессов на Земле. Ведь условия, существующие на этих небесных телах сегодня, вероятно, могли существовать на Земле сотни миллионов и миллиарды лет назад. Так, изучение Луны «открывает окно» в ранний докембрийский период истории Земли. Раскаленная поверхность Венеры — это своего рода аналог Земли, лишенной гидросферы и биосферы. Как показали недавние исследования советских автоматических станций «Венера-13 и 14», преобладающие на ее поверхности породы близки по элементному составу к породам дна земных океанов. Венера потеряла воду и окружила себя мощной горячей атмосферой из углекислого газа, в то же время атмосфера Марса крайне разрежена, но зато в верхнем слое его поверхности сохранились значительные количества воды в замерзшем состоянии. Окажись Земля ближе к Солнцу, как Венера, или дальше от Солнца, как Марс, на ней не могла бы развиться столь благоприятная для жизни климатическая среда: океаны испарились бы или замерзли, связанный в известняках углекислый газ выделился бы в атмосферу, а давление повысилось бы почти в сто раз, став примерно таким как на Венере.

Хотя Земля изучается уже не одно столетие, мы еще далеки от понимания закономерностей, управляющих сложным комплексом взаимосвязанных природных процессов и явлений, таких, как тектоническая активность, размещение полезных ископаемых, формирование погоды и климата, характер солнечно-земных связей и многое другое. Еще с большими трудностями ученые сталкиваются при попытках понять, как, когда и почему возникли на Земле условия, которые привели к появлению и бурному развитию жизни, и почему это единственная планета, на которой зародилась жизнь.

Открытия, которые приносит изучение планет, оказываются в самой тесной взаимосвязи с нашими земными проблемами. Особенности теплового режима, проблемы удержания жидкой воды и формирования климата на примере соседних планет еще острее ставят вопрос об охране окружающей среды, научного подхода к оценке допустимых масштабов воздействия на природу из-за индустриальной деятельности человека.

Огромный интерес вызывают планеты-гиганты, их многочисленные спутники, недавно открытые кольца Юпитера и Урана. Читатель познакомится с непривычными и чуждыми мирами, каждый из которых представляет удивительное сочетание физико-химических свойств, отражающих в миниатюре общие пути эволюции Солнечной системы. Уникальная природа этих тел содержит в себе многие ключевые проблемы, по образному выражению автора «бросающие вызов теоретикам», успешное решение которых неизмеримо обогатит астрофизику.

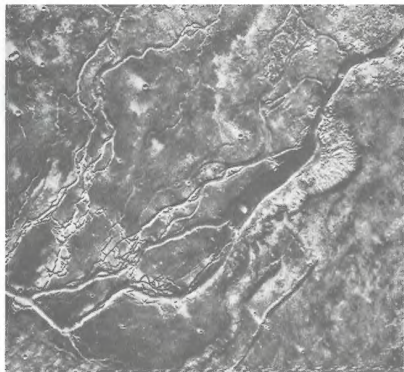
Наука в наши дни развивается быстрыми темпами. За время, прошедшее после выхода американского издания, космический аппарат «Вояджер-2» передал на Землю новую важную информацию о Сатурне, его спутниках и кольцах, а советские автоматические межпланетные станции «Венера-13 и 14» выполнили широкий комплекс исследований Венеры и передали на Землю цветные изображения ее поверхности. По просьбе автора эти панорамы включены в русское издание. Автор внес в русский перевод некоторые изменения и уточнения и написал предисловие к русскому изданию. За это сотрудничество издательство и редактор перевода выражают ему искреннюю признательность.

Несмотря на колоссальный прогресс в изучении Солнечной системы подобных книг в нашей литературе, к сожалению, немного, и они неизменно пользуются большим спросом. За последнее время вышли в свет книги Л. В. Ксанфомалити «Планеты, открытые заново».— М.: Наука, 1980, М. Я. Марова «Планеты Солнечной системы».— М.: Наука, 1981, Г. В. Войтквича «Химическая эволюция Солнечной системы».— М.: Наука, 1981 и несколько более специальный сборник «Очерки сравнительной планетологии»/Под ред. В. Л. Барсукова.— М.: Наука, 1981. Поэтому предлагаемая книга поможет восполнить имеющийся пробел.

Богато иллюстрированная превосходными «космическими» фотографиями планет и их спутников, по стилю изложения и содержанию книга доступна школьникам старших классов. Она привлечет также внимание широких кругов читателей от любителей астрономии до специалистов.

18 июня 1983 г.

М. Я. Маров



Русла высохших рек на Марсе. Текли ли они в течение последних 120 000 лет или это очень древние реки? (С любезного разрешения НАСА США.)

Предисловие к русскому изданию

Когда я писал эту книгу, фантастическая программа космических полетов к планетам и спутникам Солнечной системы была в основном завершена. Поэтому большинство новых открытий описано в тексте. После выхода книги в свет наибольшие успехи достигнуты в области интерпретации результатов и теоретического анализа.

Особенно заслуживают упоминания кольца Сатурна. Их необычная структура буквально ошеломила теоретиков. Как ни удивительно, но основы соответствующей теории были разработаны для объяснения спиральной структуры галактик, а вовсе не колец планет. В этой теории учитывается влияние собственного притяжения на движения газа или твердых частиц, обращающихся вокруг центра гравитации в тонкой дискообразной плоскости. Под влиянием масс, расположенных вблизи этой плоскости, образуются волны плотности, которые при сильных резонансных взаимодействиях имеют вид туго закрученной спирали, т.е. отчетливо разделенных колец. Их тонкие детали представляют собой динамически неустойчивые образования. Разумеется, присутствие вкрапленных в эту картину спутников заметно усложняет задачу. Ряд наблюдавшихся в кольцах особенностей до сих пор остается необъясненным.

Временная пауза в космических исследованиях планет позволяет теоретикам разобраться с наблюдениями, а наблюдателям и инженерам — подготовиться к последующим этапам исследований. То, что мы знаем сегодня, — это лишь начало.

30 июня 1983 г.

Фред Л. Уилл

Предисловие

Наступление космической эры привело к сенсационным вооружениям в исследовательских Солнечной системы. Появившиеся к Земле, астрономы потеряли всякую надежду увидеть «океан» ледовых спутников и спутниках из наблюдений, сделанных с помощью космического разведывательного океана. Новые вооружения перепетия, открыли новые пути изучения внутреннего строения и эволюции Земли, расширили Вселенной, пульсаров, черных дыр, квазаров и других удивительных проблем, повысили интерес к планетам для мироздания и представили Солнечной системы. Но усиленное осуществление программы исследования Луны, экспедиции на борту космических аппаратов «Аполло» полеты автоматических межпланетных станций к Марсу, Венере, Меркурию, Юпитеру и Сатурну восстановили интерес к Солнечной системе и глубин Вселенной.

В этой книге я попытка представить подробный материал о истории основных результатов смелых космических экспериментов, беспрецедентных в мировой истории. Она является переработанным вариантом книги «Земля, Луна и планеты» (она знакомит также с основными астрономическими представлениями, лежащими в основе современного изложения научных принципов).

К сожалению, я не могу упомянуть всех ученых, инженеров, должностных лиц и различных специалистов, которые проектировали, строили и управляли чудачными космическими аппаратами, раскодировывали посылаемые ими сигналы и интерпретировали их. Наибольший вклад в эти исследования в США внесли Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства (НАСА) и некоторые сто центры, особенно Лаборатория реактивного движения Калифорнийского технологического университета. Огромный вклад в космические исследования внес Советский Союз. Таким же значительным центром я выражаю свою искреннюю признательность. Мне хотелось бы также поблагодарить сотрудников других научных учреждений, которые оказали поддержку, предоставили материалы и информацию.

первые благодаря своему высокому общественному положению, вторые — денежными средствами.

Надеюсь, что тот, кто прочтет эту книгу, разделит мое восхищение исследованиями и открытиями, совершенными человечеством, оснащенным удивительными аппаратами и приборами. Хотя надежда найти жизнь в Солнечной системе крайне мала, я уверен, в конце концов нам удастся обнаружить свидетельства того, что мы не одиноки во Вселенной.

Я благодарен Ф. Франклину за обсуждение рукописи и критические замечания. Большую помощь в изготовлении иллюстраций оказали мне художник Дж. Сингарелла и фотограф Ч. Хансон мл. В подборе фотографий мне помог и Дж. ван дер Воуд (Лаборатория реактивного движения) и г-жа К. Бетти (Редакция журнала «Скай энд Телескоп»). Я благодарен г-же У. Голчерани за перепечатку рукописи. М. Белтон, Д. Кэмпбелл, У. Хартманн, Г. Петтенджилл, Дж. Поппак, Б. Смит, Дж. Веверка, Р. Уокер, Р. Уэлл предоставили в мое распоряжение оригинальные материалы, за что я очень им признателен.

Кембридж, июнь 1980 г.

Ф. Л. Уилл

1

Введение

Пять ярких планет известны человеку в течение многих тысячелетий, но в античные времена их отождествляли с таинственными небесными божествами; считалось, что их движения отражают причуды этих сверхъестественных существ. В древнегреческой и римской мифологии Марс был богом войны, Венера богиней любви, а Меркурий кем-то вроде посыльного. В наш космический век созданные человеком межпланетные аппараты обращаются вокруг планет и опускаются на их поверхность. Захватывающие крупномасштабные снимки продемонстрировали нам реальную сущность природы этих ярких точек на небе, показав, что планеты и их спутники — это массивные шары, состоящие из железа, камня и газа. По сравнению с четырьмя из них наша Земля кажется крошкой. Даже Луна находит себе ровню среди спутников планет-гигантов. По своему разнообразию эти тела сопоставляются с разнообразием земных условий, хотя иногда в другом, огромном масштабе. Продолжаются поиски живых организмов вне Земли, но с все меньшей надеждой на успех.

Изучение этих объектов имеет реальное значение в нашей жизни и в наших помыслах. Математические расчеты траекторий космических аппаратов — практическая инженерная задача. Химический состав атмосфер, температура, природа планет интересуют многих людей, не только ученых, но и инженеров, космонавтов, политических деятелей, военных, деловых людей и др. Строительство космических станций, создание поселений на Луне, добыча руд на астероидах перестают быть сюжетами научно-фантастических романов и переходят в разряд государственных дел. Астрономия покинула башню из слоновой кости и вошла в наш повседневный быт, планеты стали нашими ближайшими соседями.

По мере того как космический век приносит все новые и новые факты о планетах и спутниках, все яснее определяются их свойства, растет интерес к ним. Каждый год приносит решение ранее поставленных вопросов и ставит на повестку дня новые, решение которых казалось делом далекого будущего. Чтобы по достоинству оценить современные открытия и выводы, нам нужно поближе познакомиться с основными

представлениями и сведениями о Солнечной системе, накопленными к настоящему времени.

Прежде чем приступить к изучению семьи планет, связанных с ними небесных тел и других обитателей царства Солнца, сначала представим их. Когда собирается вместе большая семья, встреча может проходить в теплой или в натянутой обстановке. После этого краткого введения мы уделим внимание каждому члену семьи в отдельности, чтобы лучше познакомиться с ним.

Планеты так малы по сравнению с расстояниями между ними, а их сияние в отраженном солнечном свете столь слабо по сравнению с огромной яркостью Солнца, что ни из одной точки их никогда нельзя одновременно видеть в благоприятном для наблюдений положении. Землю можно было бы считать удобным местом для наблюдений, если бы не ее мощная атмосфера. Нам надо избавиться от этой помехи и вдобавок уйти подальше от Солнца, скажем до орбиты Юпитера. Оттуда группа внутренних планет была бы видна, как показано на рис. 1. Прежде всего мы видим, что Солнце находится почти точно в центре планетных орбит. Причина проста: на долю Солнца приходится 99,866% общей массы Солнечной системы, так что сила его притяжения почти полностью управляет движением планет.

Легко заметить также, что орбиты лежат почти в одной плоскости, очень близкой к *эклиптике* — плоскости земной орбиты. Орбита Меркурия, самой маленькой планеты, отклоняется от общей плоскости на угол 7° , но для других внутренних планет наклонение не превышает 3° . Такое предпочтительное расположение плоскостей планетных орбит близ одной плоскости не может быть случайным. Возможно, что за это ответствен Юпитер, поскольку он в 318 раз массивнее Земли и на его долю приходится 0,7 общей массы всех планет, однако строгого доказательства этого предположения нет. Юпитер безусловно можно считать «штурманом» Солнечной системы, сила тяготения которого «прокладывала курс» другим планетам. Более вероятно, конечно, что все планеты сформировались в одной плоскости, но это — проблема для будущих исследований.

Наиболее удобной единицей измерения расстояний в пределах Солнечной системы служит *астрономическая единица* (а.е.), т.е. среднее из

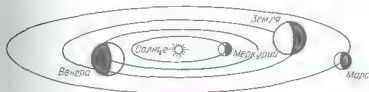


Рис. 1

Проекция орбит внутренних планет. Относительные размеры планет сохранены, но диаметр Солнца в этом масштабе составил бы 1 м.

наибольшего и наименьшего расстояния от Земли до Солнца, обычно называемое *средним расстоянием Земли*. По астрономическим и радиолокационным измерениям длина этого эталона равна 149 597 900 км. Неопределенность приведенного значения достигает примерно сотни километров. Как велика астрономическая единица, показывает следующее сравнение. Самолету, летящему со скоростью звука (~ 1200 км/с), потребовалось бы на полет от Земли до Солнца 14 лет (в один конец), а ракете, движущаяся со скоростью 10 км/с, достигнет его через 6 месяцев. Но в то же время астрономическая единица слишком мала для описания расстояний между звездами, с этой целью часто применяется гораздо большая единица — расстояние, проходимое светом за год (*световой год*). Значения светового года и некоторых параметров планет и спутников приведены в приложении 3.

Среднее расстояние Меркурия от Солнца составляет всего 0,39 а.е., Венеры 0,72 а.е., Земли 1,0 а.е., Марса 1,52 а.е. и Юпитера 5,20 а.е. (Удобный алгоритм для запоминания расстояний планет от Солнца дает правило Тихууса — Боде, приведенное в приложении 1.) Эта единая последовательность довольно хорошо представляет расположение планет по мере возрастания расстояний, за одним исключением — большого промежутка между Марсом и Юпитером. В этом промежутке мы находим тысячи малых планет, называемых *астероидами* и заполняющих пространство, в котором могла бы находиться еще одна планета (см. рис. 2 и подпись к рис. 7). Самый большой астероид Церера имеет поперечник 1003 км (т.е. сравним с большим островом), а самые мелкие едва достигают 1 км (т.е. подобны небольшой горе). Поперечник второго по величине астероида, Паллады, составляет 610 км, третьего, Весты, 540 км. Конечно, не осталось неоткрытых крупных астероидов, но есть множество (миллионы!) мелких, которые можно сфотографировать с помощью больших телескопов. Эти планеты-крошки, хотя и вносят пренебрежимо малый вклад в общую массу Солнечной системы (вероятно, 1/500 массы Земли), но отнимают у астрономов много времени на наблюдения и вычисления. Они представляют собой тонкий контрольный инструмент для проверки различного рода теорий и главный ключ к решению вопроса о происхождении Солнечной системы. Вероятно, они в основном образовались там, где находятся сейчас, хотя, безусловно, при взаимных столкновениях они калечили друг друга, покрывали рубцами, а иногда даже «четвертовали».

По своему внешнему виду планеты имеют много общего с древними богами, чьи имена они носят. Действительно, маленький и быстрый Меркурия хорошо подходит на роль посыльного. Полный оборот вокруг Солнца он завершает всего за 88 суток, меньше четверти продолжительности земного года. Его диаметр составляет 4878 км — всего 0,4 земного, но значительно больше диаметра Цереры, что позволяет отнести его к планетам, а не к крупным астероидам. В то же время некоторые спутники планет-гигантов сравнимы по размерам с Меркурием. Первое радиолокационное определение периода вращения Меркурия дало значение 59 сут. Американский космический аппарат «Маринер-10»

Рис. 1. След астероида Эрос на фоне звезд, оставленный на фотопластинке за время экспозиции участка неба (Фото Перской обсерватории)

составляет 5,2 секунды. Диаметр тела в этот период вращения в 3,12 раза больше диаметра планеты. Период обращения вокруг Солнца составляет 5,25 сут. В среднем это 14,7 раз так мало и для земного наблюдателя кажется столь близким к Солнцу, что детали ее поверхности трудно различить. Сложно представить телевизионные изображения, передающие Малтерек в трех-, показывають различные сходство с поверхностью Юпитера и Луны. Для практически лишенные атмосферы планеты с ее разреженной, возможно родимые гатна от бесчестных столкновений.

Венера — повсеместно известная планета в системе Земли. Ее диаметр почти равен земному (6027 км), тогда период обращения вокруг Солнца несколько короче (224 сут) и масса около 0,8 земной. Венера окутана протяженной атмосферой, которая столь непрозрачна, что полностью скрывает детали поверхности. Невозможно было даже определить направление ее вращения. Только после разработки радиолока-

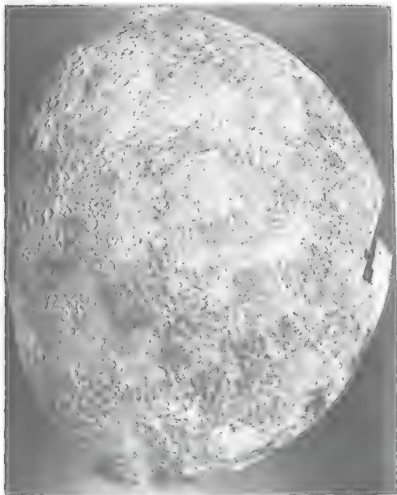


Рис 3 Мозаика изображений Меркурия, полученных «Маринером-10» в 1974 г. (С любезного разрешения НАСА США)

ционный метод. Вращение ее *обратное*, т. е. противоположное направлению обращения вокруг Солнца, период вращения составляет 243 сут. Сначала радиоастрономические наблюдения, затем измерения с советских, а позднее с американских космических аппаратов показали, что температура ее поверхности достигает 457°С. Такая температура слишком высока даже для сохранения серы в твердом состоянии, и она конденсируется в капли и пылинки вместе с каплями серной кислоты, обра-

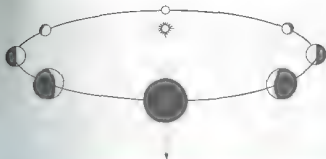


Рис. 4. Фазы Венеры для земного наблюдателя. Снимки Венеры, полученные в фазах, соответствующих рис. 5.

зуя облака, на больших высотах. Атмосфера, давление которой на поверхности достигает 90 атм, состоит в основном из углекислого газа и плотно окутывает планету.

Наземные наблюдения обеих внутренних планет затруднительны, потому что мы можем видеть только часть освещенного Солнцем полушария планеты. Когда Венера ближе всего к Земле, она имеет вид тонкого серпа, подобно молодой или старой Луне, так как находится в это время между Землей и Солнцем почти на одной прямой с ними. На рис. 4 показаны фазы Венеры, в которых были сделаны фотографии, воспроизведенные на рис. 5. Названия и определения планетных конфигураций даны в приложении 2.

Марс — это своего рода карликовая Земля (его диаметр равен половине земного диаметра) с весьма разреженной атмосферой, с четкими деталями поверхности, но лишенная океанов. Период его обращения вокруг Солнца длиннее и равен 687 сут. Марс может «похвастаться» двумя спутниками, тогда как у Меркурия и Венеры нет ни одного. Эти два спутника великоваты для медалей бога войны, так как больший из них Фобос, похожий на плохо сформированную картофелину, имеет поперечник в среднем около 22 км, а поперечник Деймоса вдвое меньше. Крупномасштабные их изображения, полученные при полетах к Марсу американских космических аппаратов «Викинг-1 и 2», приведены на рис. 6. Малые астероиды, вероятно, должны иметь сходный вид.

Как это ни удивительно, но существование этих спутников-лилипутов предсказал английский писатель Джонатан Свифт (1667—1745) в своем романе «Путешествие Гулливера», за 150 лет до их открытия в 1877 г. Согласно отчету Гулливера, астрономы летающего острова Лапута обладали небольшими, но превосходными телескопами и «открыли две маленькие звезды или спутника, обращающиеся около Марса, из которых ближайший к Марсу удален от центра этой планеты на расстояние, равное трем ее диаметрам, а более отдаленный находится



Рис 5 Фотографии Венеры, сделанные с одинаковым увеличением в разных фазах (Фото Э. Слайфера, Ловелловская обсерватория)

от нее на расстоянии пяти таких же диаметров. Первый совершает свое обращение в течение десяти часов, а второй в течение двадцати одного с половиной часа». Эти периоды обращения удивительно близки к истинным: Фобос обходит Марс за 7 ч 39 мин, Деймосу же на это требуется 30 ч 18 мин «Предсказанные» Свифтом расстояния спутников от центра Марса, однако, слишком велики: расстояние Фобоса составляет только 1,4 диаметра планеты, а Деймоса — 3,5 диаметра. Было бы интересно побольше узнать об открытиях лапутян, но Гулливер упоминает только, что лапутяне «произвели наблюдения над девяносто тремя различными кометами и установили с большой точностью периоды их возвращения.»

До недавнего времени считалось, что по периоду обращения Фобос — уникальный спутник в Солнечной системе. Его период обращения

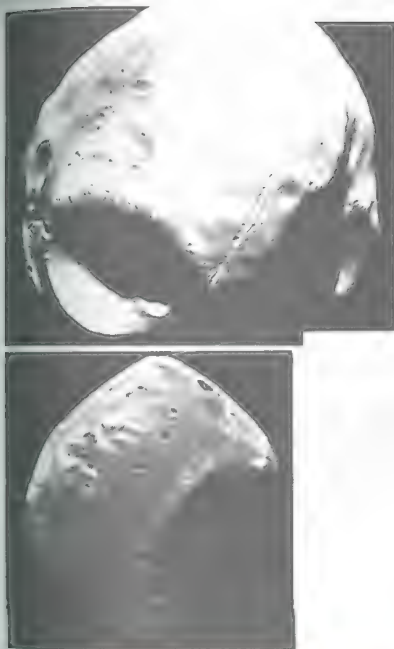


Рис. 6
Спутники Марса: сверху — Фобос, более близкий к планете, внизу — Демос. Изображения, переданные космическим аппаратом «Викинг». (С любезного разрешения НАСА США.)

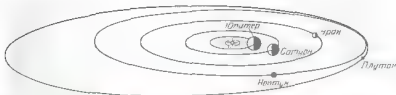


Рис. 7

Проекции орбит внешних планет. Плутон заходит внутрь орбиты Нептуна, но не пересекает ее вследствие различия наклонений. Обратите внимание на пояс астероидов и относительно малые размеры орбиты Марса в этом масштабе

меньше марсианских суток (24 ч 37 мин). Для наблюдателя, находящегося на поверхности Марса, Фобос восходит на западе и заходит на востоке! Увы, Фобос больше не уникален. Не имеющий пока названия XIV спутник Юпитера*, открытый «Вояджером 1» в 1979 г., обращается вокруг Юпитера всего за 5 ч, т. е. за половину периода вращения планеты.

Прежде чем перейти к описанию далеких больших планет, заметим, что три планеты — Меркурий, Венера и Марс — очень похожи на Землю. У всех примерно одинаковые размеры, довольно большая плотность, все они, вероятно, состоят из камня и железа. Благодаря сходству с Землей они, а также Плутон называются *планетами земной группы*. Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун — объекты совершенно иного типа. Это гиганты по сравнению с Землей, но их плотность примерно равна плотности воды. Орбиты, как они были бы видны наблюдателю, находящемуся за пределами орбиты Плутона, показаны на рис. 7. На этой схеме все орбиты, показанные на рис. 1, теснятся в малой области около Солнца. Полеты межпланетных космических аппаратов приносят нам так много сведений о планетах, что возникла новая область науки — *сравнительная планетология*, которая по существу и является главной темой предлагаемой книги (гл. 14).

Прежде всего выделяется Юпитер — наибольшая из планет. Во время полетов космических аппаратов «Вояджер-1 и 2» к внешним планетам на Землю были переданы прямо-таки фантастические изображения этой величественной системы. Солнечной системы в миниатюре, но громадной в сравнении с системой Земля — Луна. В центре находится Юпитер, диаметр которого составляет 11 земных диаметров, а масса 318 земных масс. Вследствие быстрого вращения вокруг своей оси с периодом менее 10 ч Юпитер сильно сплюснут. На телевизионных изображениях, хотя и не очень четко, видны облачные образования и движения во внешней части бездонной (?) атмосферы (рис. 8, фото I и II). Однако объяснение этой сложной структуры, создаваемой циркулирующей в верх-

* На XVIII Генеральной ассамблее Международного астрономического союза в 1982 г. этому спутнику дано название Адрастея. Прим. ред.



Рис. 8 Изображение Юпитера, полученное «Вояджером-1» 5 февраля 1979 г. На фоне диска видна Ио, ближайший к планете галилеев спутник (С любезного разрешения НАСА США)

них слоях Юпитера, выходит за рамки нашей книги. Юпитер состоит в основном из водорода, 18% по массе приходится на гелий, имеется примесь аммиака NH_3 и метана CH_4 (болотного газа). Мощные разряды молний, атрибуты верховного бога-громовержца, сверкают меж облаков. В его атмосфере наблюдалось падение большого метеорита.



Рис 9 Нептун и Тритон (Фото Ликской обсерватории)



Рис. 10 Сатурн и его спутники, сфотографированные 8 декабря 1966 г., когда кольца были видны с ребра. От верхнего левого края к нижнему правому видны Рея, вероятно, Янус (слева), Тетия (почти теряется в сиянии Сатурна), Энцелад, Диона и Титан (Фото ВМС США, полученное Р. А. Уокером мл. на 1,5-метровом рефлекторе Морской обсерватории Флатстафф Аризона)

Гравитационные силы Юпитера управляют движением четырех больших спутников, сравнимых по размерам с Луной и открытых Галилеем в 1610 г., когда он впервые направил свой телескоп на Юпитер. Необычный вид этих объектов на изображениях, переданных «Вояджерами» (фото III и IV), свидетельствует об уникальности каждого из них и требует от ученых объяснения. На самом близком к Юпитеру галилеевом спутнике Ио обнаружены действующие вулканы, впервые найденные вне Земли. У Юпитера есть еще по крайней мере десять значительно более мелких спутников. Орбиты двух из них XIV и V (Амальтея) лежат внутри орбиты Ио, причем расстояние XIV спут-

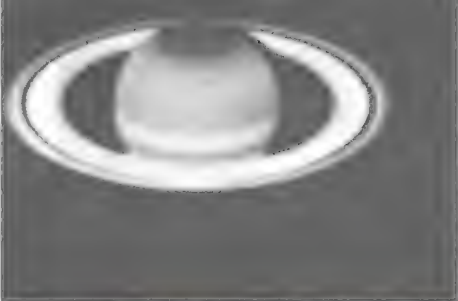


Рис. 11 Сатурн и его кольца (Фотография обсерваторий Маунт-Вилсон и Маунт-Паломар.)

ника всего лишь 30 000 км от видимой границы облаков. Не удивительно, что Юпитер, обладая сильнейшим из всех планет Солнечной системы магнитным полем, является источником мощного радиоизлучения. Из радионаблюдений можно сделать вывод, что значительная часть недр вращается как твердое тело с периодом, несколько меньшим, чем видимые нами облака.

Этот предварительный обзор планеты Юпитер дает в общем хорошее представление и о других планетах-гигантах: Сатурне, Уране и Нептуне. Нужно только иметь в виду, что они менее массивны, расположены дальше от Солнца и на сегодня гораздо хуже изучены. Нептун, самая далекая от Солнца планета-гигант (расстояние 30 а.е.), по нашим темным стандартам — крайне холодный мир. Ведь он получает в 900 раз меньше тепла и света от Солнца, чем Земля. Твердую углекислоту («сухой лед») близ ее точки плавления ($-78,5^{\circ}\text{C}$) можно считать горячей по сравнению с облаками Нептуна, где температура достигает 200°C . Азот, а также кислород должны находиться там в твердой фазе.

Хотя планеты-гиганты холодны и безжизненны, благодаря огромным расстояниям между ними и большим массам они обладают многочисленными семействами спутников. Первенство в этом отношении долгое время принадлежало Юпитеру, семья которого насчитывает 14 членов. Но недавно на первое место вышел Сатурн с 17 (а возможно, и более) спутниками. У Урана пять спутников, а у Нептуна всего два (рис. 9 и 10). Титан (спутник Сатурна) и Тритон (спутник Нептуна) по

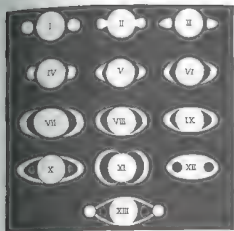


Рис 12.

Ранние зарисовки Сатурна (Из книги «*Splendour of the Heavens*», eds Г. Е. Р. Philips, W. H. Stevenson, 1923, с любезного разрешения Хачинсон и К^о, Лондон.)

размерам сравнимы с Луной, диаметры остальных спутников заключены в пределах от поперечников мелких астероидов до половины диаметра Луны. Планеты-гиганты более массивны по сравнению со своими спутниками, чем Солнце по сравнению с Юпитером и Сатурном.

Система Сатурна имеет даже более разительное сходство с Солнечной системой в целом не только потому, что у этой планеты 17 спутников (больше, чем число известных планет), но и потому что она обладает также большими кольцами — миниатюрным «поясом астероидов» (рис. 11). Эти кольца так близки к Сатурну, что в слабые первые телескопы выглядели подобно ушам или каким-то придаткам. Галилей иногда изображал на своих зарисовках Сатурн как объект, состоящий из трех частей: центрального тела и двух симметрично расположенных по бокам деталей (рис. 12). Теперь мы знаем, что кольца состоят из мелких частиц, покрытых льдом и обращающихся вокруг Сатурна в диске, относительная толщина которого по сравнению с его шириной меньше, чем у листа бумаги. При наблюдениях под различными углами кольца выглядят по-разному — они почти совершенно невидимы с ребра и демонстрируют все свое величие, когда видны при наибольшем наклоне (как говорят, максимальном раскрытии).

Недавно был получен ответ на вопрос, давно мучивший ученых: почему только у Сатурна есть кольца? Оказалось, что Сатурн вовсе не уникален. Уран и Юпитер также имеют кольца, хотя они много слабее и поэтому их трудно наблюдать. Никого теперь не удивит, если кольца будут открыты и у Нептуна. Несомненно одно: ученые будут продолжать поиски и будут находить все новые кольца и все новые слабые



Рис 13 Голова кометы Уппала-Бернаскони Кулика 28 февраля 1943 г.
(Фото Г. Гикласа, Ловелловская обсерватория)

спутники. А пока никому неизвестно, сколько крошечных спутников может кружиться вокруг планет-гигантов.

За Нептуном находится сравнительно недавно открытый Плутон. О Плуtone, как планете, известно немного. Хотя его размеры близки к размерам Луны, вряд ли это каменистое тело. Вероятно, это скопление льда и каменистых обломков, подобное кометам, но совершенно мертвое на расстоянии 40 а.е. от Солнца. Вокруг своей оси Плутон вращается с периодом 6 сут 9 ч, на его поверхности найден твердый метан. Как ни удивительно, но у Плутона тоже есть спутник, открытый в 1978 г. Дж. У. Кристи на Морской обсерватории США в виде слабого искажения почти звездообразного изображения Плутона. Спутник получил подходящее название Харон, г.е. имя перевозчика умерших через реку подземного царства Стикс. Он, по видимому, достигает размеров половинной планеты, период обращения, возможно, равен периоду вращения Плутона. Такая особенность позволяет считать Плутона *двойной* планетой, что как бы вознаграждает его за малые размеры.

Чтобы завершить краткое знакомство с семьей Солнца, следует упо-

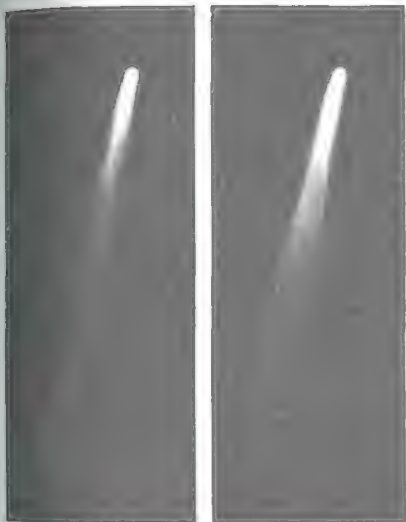


Рис 14 Два снимка кометы Галлея. Во время экспозиции телескоп был постоянно наведен на комету, поэтому изображения звезд имеют вид черточек (Фото Ляской обсерватории).

мянуть замечательные объекты кометы. Эти странные небесные скитальцы вызывали у людей суеверный страх чаще, чем любые другие небесные тела. Большинство комет движутся по чрезвычайно вытянутым орбитам и при каждом обороте приближаются к Солнцу лишь на не-

продолжительное время. Находясь далеко от Солнца, они слишком слабы для наблюдений, но в перигелии, при максимальном сближении с Солнцем, их блеск очень сильно возрастает. В это время они столь активны, что теряют заметную долю своего вещества и вокруг их ядра образуется протяженная атмосфера (кома) из газа и мелких пылевых частиц (рис. 13). Под давлением солнечного излучения и выброшенных Солнцем частиц кометные газ и пыль покидают голову кометы, порождая протяженный хвост, а то и несколько хвостов всегда сложной структуры. Хорошее представление о структуре и яркости хвоста дает рис. 14. В настоящее время астрономы принимают созданную автором этих строк теорию о кометах, как шарах, состоящих из грязного льда и проявляющих активность только тогда, когда они приближаются к Солнцу настолько, что лед начинает испаряться. Хотя кометы в большинстве своем очень малы, всего несколько километров в поперечнике, они весьма многочисленны и играли важнейшую роль в образовании внешних планет, особенно Урана и Нептуна. Вероятно, они внесли свой вклад в обогащение вещества Солнечной системы такими легкими летучими составляющими, как углерод и вода, без которых была бы невозможна жизнь на Земле.

В последующих главах мы поближе познакомимся с членами семьи Солнца. Более близкое знакомство позволит лучше определить их характер. А вопросов, разжигающих любопытство, много — это строение и проблема происхождения, «семейные отношения» и даже «семейные тайны». В следующей главе мы рассмотрим важную проблему единства семьи, силу, объединяющую все тела и удерживающую их на орбитах.

2

Почему не разлетается Солнечная система

Мощная всепроникающая сила позволяет Солнцу удерживать планеты, а планетам — спутники на их орбитах. Открытие закона всемирного тяготения, который описывает эту силу, великое достижение человеческого разума. Только такому гению, как Исаак Ньютон (1642–1727), было по плечу, исходя из имевшихся в его время материалов наблюдений и теории, разработать новые математические методы для решения задач динамики и объединить в конце концов наблюдения и математическую теорию в форме простого, но универсального закона. Чтобы лучше понять всю грандиозность этого достижения, оглянемся назад, на научные основы, из которых он исходил.

В течение двух столетий до Ньютона благодаря трудам нескольких поколений европейских ученых накапливались свидетельства и доводы, опровергающие представление о Земле, как о центре Вселенной, щедро освещаемой Солнцем, окруженной Луной, планетами, звездами, украшавшими небесную твердь. Заслуга Николая Коперника (1473–1543) состоит в том, что он опроверг идею о неподвижности Земли — идею, которую на протяжении многих веков лелеяли последователи Аристотеля (384–322 г. до н. э.). Хотя многие древние греки придерживались философской концепции движущейся Земли, авторитет Аристотеля был слишком велик. Ранние представления о движениях планет для наблюдателя с неподвижной Земли иллюстрирует рис. 15. Эта система Птолемея (2 век н. э.) объясняла известные факты хорошо и просто.

Когда идея о движении Земли получила признание, хотя и не была вполне доказана, ответить на вопрос, как и почему движется Земля, еще не представлялось возможным. Звезды удаленные солнца, находятся слишком далеко, чтобы можно было обнаружить годичные изменения их положения, обусловленные перемещением Земли на 300 млн км при обращении вокруг Солнца, даже по измерениям, сделанным значительное время спустя после изобретения телескопа. Можно посочувствовать критикам новой теории, которые упорно утверждали, что твердая Земля — это твердая Земля и что она, очевидно, неподвижна в пространстве. «Если бы она двигалась, как уверяют эти молодые выскочки, почему

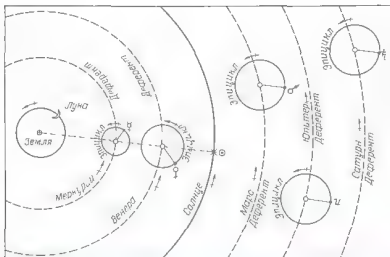


Рис 15. Система Птолемея. Согласно представлениям древнегреческого астронома Птолемея, планеты движутся по малым окружностям вокруг воображаемых планет, которые в свою очередь движутся вокруг неподвижной Земли (из книги С. 4 Young *A Text-Book of General Astronomy*, 1888, с любезного разрешения Джинн энд Ко.)

тогда звезды не меняют систематически своего положения на небесной сфере в течение года». Этот аргумент звучал вполне убедительно и был опровергнут лишь в XIX в с помощью точнейших методов наблюдений. Ближайшая звезда, Проксима Центавра, удалена от нас на 270 000 а.е. С нее радиус земной орбиты виден под меньшим углом, чем человеческий волос с расстояния 15 м. Таким образом, годичные угловые смещения Проксимы Центавра меньше видимого смещения волоса при сдвиге его на два диаметра. Годичные смещения остальных звезд еще меньше.

Хотя этот аргумент против движения Земли долго оставался неопровержимым, трудности предсказания положений Солнца и планет с возрастанием точности наблюдений становились все более и более серьезными. С изобретением часов повышение точности предсказаний и создание более эффективных инструментов для измерения угловых положений на небесной сфере стали еще более актуальными. Необходимо было точно знать, как планеты движутся в пространстве. Суточное вращение Земли (рис 16) и ее годичное обращение, как нам теперь известно, сильно усложняют задачу, потому что все наблюдения приходится делать с движущегося тела. Вдобавок лучи света, проходя через атмосферу, могут отклоняться, причем вблизи горизонта угол отклонения может достигать полградуса.

Влияние вращения Земли и преломления лучей атмосферой можно



Рис. 6

Доказательство вращения Земли вокруг своей оси. Снимок с неподвижной камерой, направленной на северный полюс мира, экспонизия 8 ч. Жирный след близ центра принадлежит Полярной звезде (Фото Ф. Чеппелла, Ликская обсерватория)

в основном устранить, если определить относительные положения звезд по всей небесной сфере в неподвижной системе координат и затем измерять положения планет относительно этих звезд. Видимое перемещение Марса во время одной из *опозиций* (определения планетных конфигураций см. в приложении 2) показано на рис. 17. Эта характерная кривая, изображенная на фоне звезд, мало похожа на гладкую кривую истинного движения, показанную на рис. 1.

В XVI в. великий датский астроном Тихо Браге (1546-1601) приступил к работам по накоплению и уточнению данных о движениях планет. Принципы его работы включали все существенные элементы подлинной науки, о которых всегда должен помнить каждый ученый. Тихо Браге создал лучший для своего времени инструмент, выполнил наблюдения со всей достижимой точностью, тщательно изучил возможные ошибки инструмента. Полученные им длинные ряды наблюдений Марса были детально проанализированы Иоганном Кеплером (1571-1630) в Вюртемберге, который перепробовал множество кривых в качестве

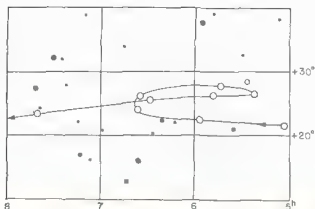


Рис 17 Видимый путь движения Марса на фоне звезд за 8 месяцев. Кружками отмечены положения Марса через каждый месяц.

орбит планет. Некоторые типы нецентральных движений очень близко соответствовали наблюдениям, но Кеплер стремился к идеалу. Благодаря своему упорству он открыл в конце концов три очень простых закона, описывающие движение планет вокруг Солнца. Простой закон, если он хорошо согласуется с наблюдениями, всегда доставляет ученому эстетическое наслаждение и вдохновляет его. Кеплер был уверен, что узнал истинные движения планет; время подтвердило его правоту. Законы Кеплера описывают также движение межпланетных космических аппаратов, летящих с отключенными двигателями, и движение спутников планет.

Первый закон Кеплера гласит, планета движется по эллипсу в одном из фокусов которого находится Солнце. Эллипс — одна из простейших замкнутых плоских кривых. Эту фигуру очень любят математики, так как для нее справедливы многие простые теоремы. Построить эллипс почти так же просто, как начертить окружность. Достаточно взять круглый конус и пересечь его плоскостью b (рис 18). Линия пересечения этих двух поверхностей и будет эллипсом. Если провести плоскость через вершину конуса перпендикулярно его оси, то в сечении получится точка; сечение конуса плоскостью a , перпендикулярной его оси дает окружность. В случае сечения плоскостями v и z получим параболу или даже гиперболу, если секущая плоскость почти вертикальна. Эти варианты хорошо известны математикам, которые называют все упомянутые выше кривые коническими сечениями и даже выводят для них общие теоремы.

Так, несколько теорем описывают свойства фокусов эллипса. Например, если провести прямую из одного фокуса до пересечения с эллипсом, а затем под тем же углом к касательной провести другую прямую (как показано на рис. 19), то она всегда пройдет через второй фокус.

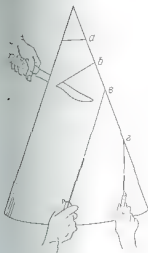


Рис. 18.

Сечение конуса плоскостью. При этом можно получить окружность (а), эллипс (б), параболу (в) или гиперболу (г).

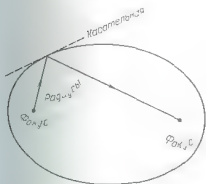


Рис 19.

Эллипс. Линии, проведенные из двух фокусов в одну точку эллипса, образуют с касательной, проведенной в этой же точке, одинаковые углы. Эксцентриситет изображенного на рисунке эллипса равен 0,72

Еще проще картина в случае параболы — лучи, исходящие из фокуса, отражаются от параболы в виде параллельного пучка. Этот принцип лежит в основе действия прожектора и автомобильных фар. И наоборот, пучок параллельных лучей от удаленной звезды, падающих на параболическую поверхность зеркала, собирается в одной точке фокусе: это принцип действия телескопа-рефлектора (рис. 20).

Еще одно замечательное свойство эллипса состоит в том, что сумма расстояний от любой точки эллипса до обоих фокусов постоянна. На этом свойстве основан очень простой способ вычерчивания эллипса (рис. 2.). Воткнем две булавки в лист бумаги в точках, где должны быть фокусы. Затем накинem на них нитяную петлю. Гуго натянем нитку кон-

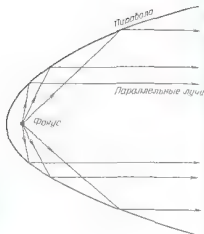


Рис. 20.

Парабола. Все лучи, исходящие из фокуса, отразившись, образуют параллельный лучок.

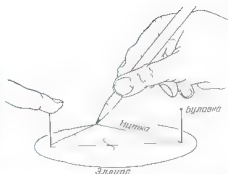


Рис. 21.

Вычерчивание эллипса с помощью двух булавок и нитяной петли. Этот метод всем хорош, мешает только узел. Лучше привязать нитку к одной из булавок.

чиком карандаша и вычертим эллипс, двигая карандаш вокруг булавок внутри натянутой петли. Если обе булавки воткнуть в одну точку, то вычерченная фигура будет окружностью простейшим эллипсом.

Согласно первому закону Кеплера, Солнце всегда находится в одном из фокусов эллипса, причем другой фокус пуст — это ничем не примечательная точка. Различные возможные орбиты изображены на рис 22. Ближайшая к Солнцу точка орбиты называется *перигелием*, самая далекая — *афелием*. Среднее расстояние планеты от Солнца равно полусумме расстояний в афелии и перигелии, или половине большой оси эллипса. Форма орбиты определяется *эксцентриситетом* — отношением разности расстояний в афелии и в перигелии к их сумме. Эксцентриситет окружности равен нулю, параболы — единице.

Земная орбита почти круговая, ее эксцентриситет составляет всего

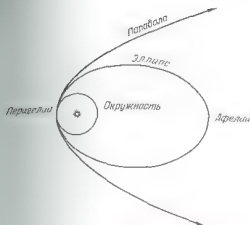


Рис 22

Различные типы околосолнечных орбит. Кометы движутся вокруг Солнца по сильно вытянутым эллипсам или по параболам. Орбиты планет — эллипсы, близкие к окружности.



Рис. 23.

Закон площадей. Радиус-вектор планеты, движущейся по этой орбите, описывает заштрихованную область за одно и то же время. Эксцентриситет изображенного эллипса равен 0,5.

¹ ₆₀. На глаз такой эллипс кажется почти идеальной окружностью, но ясно видно, что фокус находится не в центре. Лишь у Меркурия и Плутона орбиты сильно отличаются от окружностей, их эксцентриситеты равны соответственно 0,21 и 0,25. Вследствие этого расстояние Плутона от Солнца меняется от 30 а. е. в перигелии (что меньше среднего расстояния Нептуна) до 50 а. е. в афелии. Проведем простой расчет: среднее из 30 и 50 равно 40 — среднему расстоянию Плутона в астрономических единицах, $(50-30) (50+30) = 20 \cdot 80$, или 0,25, т.е. эксцентриситету.

Второй закон Кеплера еще проще, чем первый: при движении планеты вокруг Солнца прямая, соединяющая планету с Солнцем, описывает равные площади в равные промежутки времени. Значит, когда планета находится близко к Солнцу, в перигелии она должна двигаться с большей скоростью, чем тогда, когда она находится дальше от Солнца, скажем в афелии (рис. 23). Скорость Плутона в перигелии составляет 6,1 км/с, а в афелии — 3,7 км/с. Отношение скоростей равно 5,3, что мож-

но было получить из отношения расстояний. В перигелии (около 1 января) скорость Земли на 1,0 км с больше, чем скорость в афелии, равная 29,3 км/с.

Согласно третьему закону Кеплера, *квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца пропорциональны кубам их средних расстояний*. Этот закон дает простой метод вычисления периода обращения тела вокруг Солнца, если известно его среднее расстояние. Возьмем среднее расстояние в астрономических единицах и возведем его в куб. Квадратный корень из этой величины и есть период обращения в годах. Для Земли формула проверяется исходя из определений астрономической единицы и года: квадратный корень из 1^3 равен 1, т.е. период обращения Земли равен 1 году. Среднее расстояние Нептуна от Солнца составляет 30 а.е., $30^3 = 27000$. Извлекая квадратный корень из 27000, получим 164 — период обращения Нептуна в годах. Более точное значение периода равно 164,8 года, оно определено с более точным значением среднего расстояния.

С помощью трех законов Кеплера движение планет можно предсказать далеко вперед. В настоящее время вводятся только сравнительно небольшие поправки. Поскольку планеты имеют массу, они возмущают движения друг друга, небольшая поправка должна быть введена для Меркурия, чтобы учесть эффект, предсказываемый общей теорией относительности Эйнштейна.

Ньютону были хорошо известны кеплеровские законы движения планет, так же как революционная идея Галилео Галилея (1564–1642) о том, что все тела падают с одинаковым ускорением независимо от их массы. Говорят, что Галилей доказал эту идею, бросая тела разной массы с башни, возможно, с падающей башни в Пизе. Согласно другой революционной идее Галилея, в безвоздушном пространстве тела будут находиться в состоянии движения, если на них не действует сила. Хорошо известный конфликт между Галилеем и католической церковью возник главным образом потому, что Галилей проповедовал теорию Коперника о движении Земли.

Ньютон расширил представления Галилея о движении материальных тел в безвоздушном пространстве и вывел три простых закона. Эти законы так широко известны сегодня, что мы приведем их здесь только ради полноты изложения. Согласно первому закону Ньютона, *тело остается в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, пока на него не действуют никакие силы*. Второй закон гласит: *изменение скорости движения (ускорение) пропорционально действующей силе* (это определение силы). По третьему закону, *действие и противодействие равны по величине и противоположны по направлению*. В современном мире машин и механизмов с этими законами мы сталкиваемся всюду. Отсутствие измерений сил трения как при движении в воздухе, так и между движущимися частями машин и механизмов было одной из трудностей, мешавших более раннему открытию этих законов.

Сформулировав эти законы, Ньютон начал размышлять о движе-

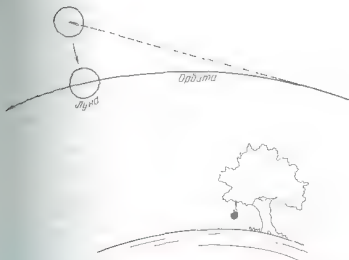


Рис. 24

Падение Луны и падение яблока. Ньютон сделал вывод, что земное тяготение заставляет Луну падать на Землю, поэтому ее траектория отклоняется от прямой линии. Яблоко падает на Землю в соответствии с тем же законом.

ниях Луны и планет. Если посредством силы тяготения Земля притягивает и яблоко, и пушечное ядро, и перо, причем каждое тело с силой, пропорциональной массе, то почему она не должна притягивать Луну? Вель если бы на Луну не действовала никакая сила, она должна была бы двигаться по прямой. Но Луна движется по кривой, огибающей Землю. Значит, она постоянно падает по направлению к Земле, причем скорость падения измеряется отклонением от прямой (рис. 24). Таким образом, притяжение Земли действует на Луну с силой как раз такой величины, чтобы вызвать наблюдаемое падение.

«А как сила притяжения ослабевает с расстоянием от Земли?» спросил Ньютон. Чтобы дать ответ на этот вопрос, он сначала вывел закон центростремительной силы. Такая сила действует, например, на тело, если его привязать к концу веревки, другой конец которой закреплен, и раскрутить. Он нашел, что для создания центростремительной силы сила тяготения должна уменьшаться обратно пропорционально квадрату расстояния от центра притяжения. Затем из законов Кеплера Ньютон независимо сделал вывод, что планеты также должны притягиваться к Солнцу с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния.

Теперь Ньютон был готов проверить свою теорию на примере движения Луны. Здесь он столкнулся с трудностями. Сначала он использовал ошибочное значение размеров Земли, в след за тем некоторые затруднения возникли при доказательстве положения, что сферическая

Земля гравитационно должна действовать так, как будто вся ее масса сосредоточена в ее центре. Наконец, проверка была закончена. Ньютон, собрав вместе все результаты, пришел к заключению: *каждая материальная частица во Вселенной притягивает каждую другую частицу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.* Это и есть закон всемирного тяготения, который объясняет все сложные движения в Солнечной системе с высокой степенью точности, достижимой при астрономических измерениях (около одной миллионной). Единственным отклонением является смещение перигелия Меркурия со скоростью около $43''$ в столетие, которое объясняется малой поправкой к закону Ньютона, предсказываемой общей теорией относительности Эйнштейна. (Под углом $43''$ видна радужная оболочка глаза с расстояния 50 м.)

Таким образом, Солнечная система существует благодаря силе притяжения Солнца, действующей на планеты, а системы спутников благодаря силе притяжения планет. Задача была бы очень проста и решалась с помощью законов Кеплера, если бы не было неблагоприятного обстоятельства: каждая планета притягивает все другие, а также их спутники и Солнце. Это всеобщее тяготение так сильно усложняет задачу, что она не может быть решена точно. Спасает положение то, что планеты гораздо менее массивны, чем Солнце, и поэтому силы их взаимодействия, пропорциональные массам, значительно меньше силы притяжения Солнца. Точно так же массы спутников существенно меньше масс планет. Вследствие этого законы Кеплера можно использовать только для приближенного решения и затем вносить малые поправки, учитывающие взаимное тяготение тел. Эти поправки называют *возмущениями*, так как планеты возмущают движение изучаемого тела относительно Солнца.

С наиболее трудной классической задачей возмущений мы встречаемся в системе Земля — Луна, в которой Солнце возмущает движение Луны вокруг Земли и для которой мы располагаем превосходными наблюдениями благодаря близости Луны. Строго говоря, Земля возмущает движение Луны вокруг Солнца, поскольку Солнце притягивает Луну с силой, приблизительно вдвое превышающей силу земного притяжения. Однако нет никакой опасности (по крайней мере в течение ближайших нескольких сотен миллионов лет), что Солнце может «похитить» Луну и оставить нас в теплые летние ночи без источника вдохновения. Система Земля — Луна такая тесная, тела движутся так близко друг к другу, что роль солнечного тяготения сводится к тому, чтобы удерживать оба тела на средней эллиптической орбите вокруг Солнца. Основные выводы таковы: во-первых, орбита Луны нигде не имеет выпуклости в направлении Солнца (рис. 25) и, во-вторых, расчеты движения Луны весьма трудоемки. Одно-единственное уравнение движения Луны занимает свыше 250 крупноформатных страниц и представляет главный итог работы, выполненной до появления современных электронных вычислительных машин. Теперь ЭВМ могут быстро провести необхо-

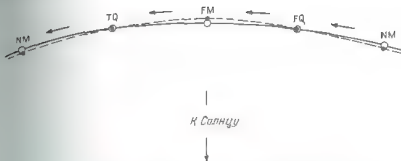


Рис 25

орбита Луны вокруг Солнца. Орбита Луны всегда выпукла относительно Солнца, что можно увидеть, если наклонить страницу и смотреть вдоль штриховой линии. Сплошная линия — орбита Земли, штриховая линия — орбита Луны.

димые расчеты путем разложения в ряды и дать точное численное решение

Дополнительные небольшие усложнения в движении Луны возникают из-за отклонения формы Земли от идеальной сферы и неточного совпадения точки притяжения с центром Земли. Орбиты искусственных спутников Земли также испытывают сильные возмущения вследствие этого эффекта, и еще, что может показаться удивительным, под действием давления солнечного излучения и даже собственного (теплового) излучения Земли. Кроме того, торможение в очень сильно разреженной верхней атмосфере Земли стремится уменьшить радиус их орбиты. Периоды обращения искусственных спутников малы: минимальный составляет всего лишь 88 мин, так что все эти сложные воздействия нужно вычислять очень быстро, иногда в течение нескольких минут. Таким образом, ЭВМ, позволяющие производить расчеты в миллионы раз быстрее по сравнению с прежними методами, необходимы для успешного выполнения программ полетов спутников и космических аппаратов. Без них трудно обойтись практически во всех областях современной науки.

Из всех планет Юпитер — самый большой «смутьян» в Солнечной системе; он возмущает движение всех планет и астероидов. Обладая массой 0,001 массы Солнца — львиной долей общей массы планет, Юпитер вызывает наибольшие возмущения, особенно астероидов, тел наиболее близких к нему в пространстве (рис. 7). Если орбиту астероида рассчитывать без учета притяжения Юпитера, ошибки предсказания его положения могут достигнуть нескольких градусов за несколько лет. Иногда астероиды даже теряются, так что приходится открывать их заново и отождествлять по их орбитам и блеску.

Систематическое влияние Юпитера на движение астероидов проявляется в их распределении по периодам обращения и большим полу-

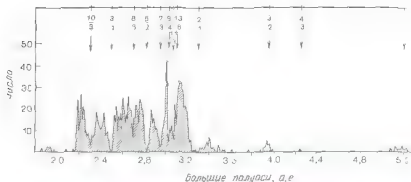


Рис. 26. Промежутки («локи») Кирквуда в распределении периодов астероидов. Дроби — отношения периода Юпитера к периодам обращения астероидов (С любезного разрешения журнала *SA, the Telescope*).

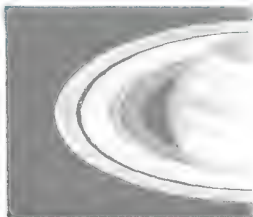


Рис. 27. Кольца Сатурна, рисунок Лью (Экземпляр предоставлен А. Дюффюсом).

осям (рис. 26). Обращают на себя внимание пробелы вблизи значений периодов, отношения которых к периоду обращения Юпитера равны отношениям целых чисел, например $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$ и $\frac{1}{2}$. В то же время выделяется небольшая группа около значения $\frac{2}{3}$. Детальное объяснение этого эффекта очень сложно и включает учет взаимодействия астероидов друг с другом. В системе колец Сатурна пояса астероидов в миниатюре наблюдается такая же картина. Факт существования системы колец, а не единого кольца объясняется возмущениями орбит мельчай-

ных спутников, образующих кольца, со стороны трех внутренних спутников Мимаса, Энцелада и Тетиды. Эти спутники заставляют четкие частицы кольца избегать некоторых областей соответствующих определенным скоростям движения вокруг Сатурна, образуя темные промежутки, отмечают критические расстояния. Деппенс Кассини (Дж. Д. Кассини, 1625-712) отмечал темный промежуток между внешним и средним кольцами (рис. 27), занимает область, период обращения в которой должен быть равен половине периода Мимаса, трети Энцелада и четверти Тетиды, т.е. несколько больше 11 ч. Можно наблюдать также другие темные промежутки между кольцами.

В этой главе мы рассмотрим закон всемирного тяготения, связывающий силу действующую между массами. Обобщая теорию относительности Альберта Эйнштейна (1879-1955), уточняет этот закон Ньютона путем введения небольших поправок, но что гораздо важнее, она полностью изменяет основные представления. В философском смысле понятие *действия на расстоянии*, или силы, значительно шире. Согласно Эйнштейну, любая масса искривляет, или искривляет, пространственно-временной континуум, ее окружающий. Но при сравнительно небольших скоростях траектории движущихся тел очень близки к предсказанным законом Ньютона. В Солнечной системе отклонения от этих траекторий редко поддаются измерениям, так что рассмотрение, проведенное в настоящей главе и основанное на представлениях Ньютона, является используемой на практике рабочей моделью, хорошим приближением к реальной действительности. Философский смысл теории относительности, интересная тема для любознательного читателя.

Большие значения отношения масс Солнца и планет, масс планет и их спутников не могут быть случайным обстоятельством. Если бы массы планет были сравнимы с массой Солнца, то Солнечная система выглядела бы совершенно иначе. Ни одно из тел не находилось бы вблизи центра тяготения системы, как сейчас Солнце, все тела двигались бы по сложным кривым почти непредсказуемого вида. Хотя не существует точного решения даже задачи трех тел (примерно равных масс), можно показать, что в рассматриваемом гипотетическом случае результат был бы катастрофическим. Некоторые планеты будут разрушены при столкновениях, другие будут выброшены из системы, так что в конце концов в ней останутся два наибольших тела, обращающихся относительно друг друга на умеренном расстоянии, и значительно меньшие спутники или их системы. Тела больших размеров могут оставаться в системе только на очень больших расстояниях от двух крупнейших. В устойчивых системах каждая подсистема, например Юпитер с его спутниками, должна быть отделена достаточно большими расстояниями от других подсистем, чтобы они слабо возмущали движение друг друга. Действительно, изучение двойных и кратных звезд показывает, что они встречаются преимущественно парами, отделенными от других пар относительно большими расстояниями. В течение ближайших сотен миллионов лет нет никакой опасности, что Солнечная система потеряет планету или проглотит, их катастрофическое столкновение.

3

Открытие Нептуна и Плутона

Увлекательная история открытия Нептуна и Плутона начинается с открытия Урана, поскольку без наблюдений Урана обе планеты были бы открыты значительно позже. Обнаружение Урана знаменует начало новой эпохи в астрономии, так как это была первая планета, которую предстояло открыть Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн во все времена были видны невооруженным глазом (если, конечно, зрение наших далеких предков не было значительно слабее, чем у нас).

Сэр Уильям Гершель (1738–1822), вероятно самый усердный наблюдатель всех времен (рис. 28), первым заметил малый диск Урана (диаметром 3,6") в 1781 г. Его сообщение о сделанном открытии ясно показывает, что он не сразу установил истинную природу нового объекта. В научном журнале *Philosophical Transactions* за 1781 г.* читаем: «Во вторник между 10 и 11 вечера, когда я изучал слабые звезды в соседстве с η Близнецов, я заметил одну, которая выглядела больше остальных. Удивленный ее необычным размером, я сравнил ее с η Близнецов и небольшой звездой в квадрате между созвездиями Возничего и Близнецов и обнаружил, что она значительно больше любой из них. Я заподозрил, что это — комета».**

Сообщение Гершеля об открытии кометы было естественным и привычным, ничего другого об истинной природе открытого объекта он предположить не мог. Потребовалось несколько месяцев наблюдений и вычислений, чтобы показать, что наблюдения не соответствуют кометной орбите и что открытый объект не что иное, как новая планета.

Нужны были необыкновенно острый глаз и прощательность, присущие Гершелю, чтобы выделить планету среди соседних звезд только по ее виду. Другие наблюдатели во время своих определений координат окрестных звезд 17 раз измерили положение Урана, не заметив ничего необычного в нем. Некоторые крупные астрономы того времени с тру-

* William Herschel A Count of a Comet, Phil. Trans., 71, 492, 1781. Прим. ред.

** Цитируется по книге А. Паннекук История астрономии М. Наука 1966, с. 377.—Прим. ред.

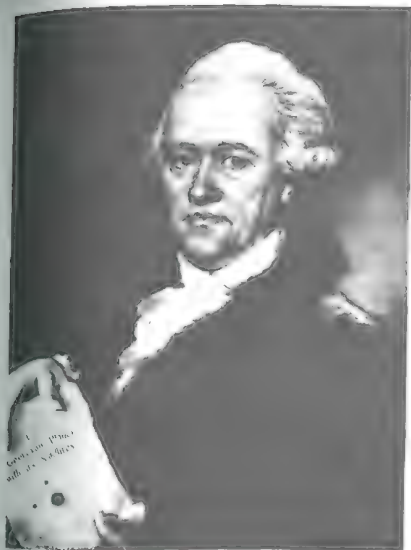


Рис 28 Сэр Уильям Гершель

дом отождествляли планету, даже располагая данными о ее точном положении на небе.

В течение нескольких лет у планеты не было официального названия. Предлагалось назвать ее «Звездой Георга» (название, данное Гершелем в честь короля Георга III), а также «Гершелем» в честь первооткрывателя. В конце концов было принято современное название в традициях наименования других планет.

Несмотря на медленное движение Урана (период обращения вокруг Солнца 84 года), его орбиту удалось довольно точно определить в относительно короткий срок после открытия, используя 17 случайных наблюдений, сделанных еще до того, как Гершель обратил внимание на диск. Первое наблюдение было сделано в 1690 г. за «ураннианский год» до открытия. При вычислении орбиты встретились некоторые трудности в согласовании всех наблюдений, однако возможные ошибки наблюдений или отклонения вследствие возмущений, вызванных другими планетами, казались достаточно большими, чтобы объяснить эти расхождения. Но когда Уран начал заметно отклоняться от расчетного пути даже после тщательного учета возмущений, вызванных Юпитером и Сатурном, некоторые астрономы стали подозревать, что движение Урана может нарушать неизвестная планета.

В 1820–1830-е годы отклонения были достаточно велики, чтобы возникли такие подозрения, но математические трудности предсказания положения неизвестной планеты в то время казались непреодолимыми. К 1845 г. Уран сместился со своего места на «недопустимую величину» $2'$ углол, едва различимый невооруженным глазом. Выдающийся французский астроном Урбен Жан Жозеф Леверрье (1811–1877) в 1846 г. показал, что ни одна возможная орбита не способна удовлетворить сразу всем наблюдениям в пределах допустимых ошибок. Он пришел к заключению, что отклонения можно объяснить только гипотезой о существовании неизвестной массивной планеты, более далекой, чем Уран.

Позднее в 1846 г. Леверрье закончил вычисления положения гипотетической планеты и был так уверен в своем анализе, что отважился предсказать ее место и наличие видимого диска. Он послал свои предсказания молодому немецкому астроному Иоганну Готфриду Галле (1812–1910), который открыл планету в ту же ночь, как только получил сообщение: Нептун находился на небе в $1'$ (меньше двух диаметров Луны) от вычисленного Леверрье положения. Своим быстрым успехом Галле был обязан новой звездной карте южной области неба, имевшейся в Берлине. При быстром обзоре неба с помощью телескопа был найден новый объект там, где на карте звезды не было. Тщательное исследование подтвердило, что объект имеет диск хотя и довольно малый, а поэтому трудноразличимый.

Замечательное открытие новой планеты путем математических расчетов стало вехой в истории астрономии. Как в случае многих крупных открытий, заслугу в совершении этого открытия нельзя приписать одному человеку. В то время, когда Леверрье проводил свои блестящие вычисления, молодой неизвестный английский математик Джон Кау

Адамс (1819-1892) независимо получил такой же результат, правда несколько другим методом. Адамс закончил расчеты примерно на восемь месяцев раньше, чем Леверрье, но неблагоприятные обстоятельства помешали английским наблюдателям опередить Галле. В то расстройство еще не было Берлинской карты звездного неба, которая так существенно помогла Галле. Поэтому Джеймс Чэпмен (1804-1883) нерешительно приступил в Кембридже к поискам планеты трудоемким методом нанесения на карту всех звезд в области ее предполагаемого местонахождения с измерением повторить наблюдения некоторое время спустя, чтобы выявить плащегу по ее движению. Нептун мог и бы открыть, также на Королевской обсерватории в Гринвиче, однако королевский астроном Д. Б. Эйри относился к теоретическим методам отрицательно и просто не поверил в то, что Адамс мог сделать надежное предсказание.

Для Адамса, который, по-видимому, планировал свое исследование несколькими годами раньше, чем получил возможность его осуществить, такой поворот событий имел драматический характер. После его смерти в его архиве была найдена следующая запись: «3 июля 1841 г. В начале этой недели составил проект исследования (осуществление которого начну при первой возможности после получения степени) несправильностей в движении Урана, которые пока не объяснены, чтобы установить, нельзя ли отнести их на счет неопытной планеты за ним, и если возможно, откуда приблизительно определить элементы ее орбиты и т. д., что, быть может, приведет к ее открытию».

С удовлетворением отметим, что сейчас честь предсказания существования Нептуна и определения его положения делится между Леверрье и Адамсом. Заслуга фактического обнаружения Нептуна, конечно, полностью принадлежит Галле. Подобно Урану, Нептун в ходе более ранних измерений звездных положений также ошибочно приписывался за звезду.

Покорение Солнечной системы с помощью закона всемирного тяготения Ньютона и кропотливых наблюдений продолжалось в текущем столетии. Кульминацией этих усилий стало открытие Плутона при обстоятельствах, удивительно сходных с теми, при которых был открыт Нептун. Опять при первых поисках новая планета наблюдалась, но капризная фортуна задержала ее открытие.

В начале нашего столетия Персиваль Ловелл (1855-1916), основавший обсерваторию для наблюдений планет, и прежде всего Марса, во Флагстаффе, шт. Аризона, проявил большой интерес к возможной транснептуновой планете (рис. 29). Он заново исследовал движение Урана и пришел к выводу, что ошибки наблюдения будут существенно меньше, если ввести возмущения от неизвестной планеты. Вычисленные Ловеллом орбита и положения «планеты икс» были опубликованы лишь в 1914 г., хотя он начал поиски в 1906 г. Через 24 года, в 1929 г., был построен и установлен на Ловелловской обсерватории новый 32-сантиметровый телескоп-рефрактор, предназначенный для ее поисков.



Рис. 29

Персиваль Ловелл чьи предсказания и энтузиазм привели в конечном счете к открытию Плутона.



Рис 30

Клайд Томбо у бинокля-компаратора, из которых он провел 700 часов в поисках планеты. Фото Ловелловской обсерватории

Систематическое фотографирование областей неба вдоль эклиптики было поручено молодому ассистенту Клайду Томбо. Каждую область он фотографировал с большой экспозицией дважды с интервалом между снимками 2-3 суток, а затем полученные снимки тщательно сравнивал. Для сравнения снимков использовался бинокль-компаратор — прибор с двумя микроскопами, который позволяет наблюдателю рассматривать одну и ту же область неба попеременно на двух пластинках (рис 30). Любой объект, который менял свое положение на небе за время между двумя экспозициями, как бы прыгал на фоне звезд, оставшихся неподвижными (рис 31).

12 марта 1930 г., менее чем через год после начала новой программы наблюдений, Ловелловская обсерватория разослала астрономическим обсерваториям следующую телеграмму: «Систематические поиски начатые годы назад дополняющие ловелловские исследования транснептуновой планеты обнаружили объект: скорость и путь которого за семь недель хорошо соответствуют приближенному расстоянию Ловелл предсказал транснептуновому телу. Величина пятнадцатая. Положение двенадцатого марта три часа Гринвичу семь секунд западнее Дельта Близнецов согласующееся предсказанной Ловеллом долготой».

Астрономический мир вскоре единодушно принял название Плутон, вполне подходящее для этой планеты, движущейся во мраке на перифе-

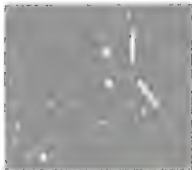


Рис. 31 Фотографии, по которым был открыт Плутон слева от 23 января 1930 г., справа от 29 января 1930 г. (Снимки К. У. Томбу с 32-сантиметровым телескопом-рефрактором Лоуренса Ловелла на Ловелловской обсерватории.)

рии Солнечной системы. Первые две буквы названия к тому же соответствуют инициалам Персиваля Ловелла (Он умер в 1916 г., всего через два года после публикации своей детальной работы).

Последующие расчеты орбиты с использованием фотографий, на которых видна новая планета, полученных еще до ее открытия, показали, что она обращается вокруг Солнца с периодом 249,9 года по орбите, наклоненной к средней плоскости движения других планет под углом 17°. Ее перигелий находится внутри орбиты Нептуна, но вследствие большого наклона орбиты столкновение этих двух тел исключено.

Только своеобразный случай помешал астрономам обсерватории Маунт Вилсон открыть Плутон в 1919 г. Тогда по предложению Уильяма Пикеринга (1858–1938), который независимо вычислил положение транснептуновой планеты, Милтон Хьюмanson сфотографировал области неба около предсказанного места. На некоторых пластинках были получены изображения планеты, но на одной из двух лучших пластинок изображение Плутона попало прямо на небольшой дефект «мульти» (с первого взгляда оно казалось частью дефекта), а на другой изображение частично налагалось на изображение звезды. Даже в 1930 г., когда положение Плутона в 19,9 г. стало достаточно хорошо известно, и данных о его орбите, было трудно отождествить эти изображения, полученные 11 годами раньше.

Масса Плутона все еще не определена, но вряд ли она достаточно велика, чтобы вызвать такие отклонения в движении планеты, на основании которых было предсказано его существование. По нескольким открытиям звезд Плутоном установлено предельное значение его диаметра, оказавшееся близким к диаметру Луны. Возможное существование близкого спутника ограничивает его массу и плотность значениями, совместимыми с его размерами. Поэтому следует признать, что основанием для предсказания Плутона, несомненно, послужили систематиче-

ские ошибки, составляющие $1\ 2''$, в ранних наблюдениях Нептуна и Урана. Тем не менее открытие, последовавшее за неустанными поисками планеты, представляет собой выдающееся достижение.

Томбо продолжил на Ловелловской обсерватории поиски других планет по всей небесной сфере и пришел к выводу, что не существует планет, доступных для обнаружения с помощью 32-сантиметрового телескопа. Если и есть другие планеты, то они должны быть значительно слабее Плутона, т.е. они или находятся много дальше Плутона, или много меньше него. Некоторые астрономы сомневаются в существовании крупных планет, которые можно обнаружить. Не исключено, что во внешних областях Солнечной системы имеется множество крошечных планет размерами с астероиды.

4

Массы и размеры

Чтобы постичь истинную природу планет, необходимо знать их массы и расстояния между ними. Только зная массы мы можем начать изучение реального строения отдельных тел. Знание расстояний, размеров и масс с высочайшей точностью необходимо, кроме того, для осуществления посадки космических аппаратов на планеты и их спутники. Таким образом, для расширения наших знаний мы опираемся на уже накопленный материал.

Расстояние от Земли до Солнца

Звезды, кажущиеся яркими точками, разбросанными по всему небу, образуют великолепную опорную систему, относительно которой мы можем определять положения движущихся тел Солнечной системы. Как мы отметили в гл. 2, звезды так далеки, что перемещение Земли в пространстве, за исключением немногих случаев, не вызывает заметного изменения их видимых положений. Таким образом, путем точного определения направлений на Солнце и на планеты относительно звезд мы найдем их угловые положения в хорошо установленной опорной системе.

Далее, располагая длинными рядами точных наблюдений и вычислений, охватывающими сотни лет, мы можем применить закон всемирного тяготения Ньютона и рассчитать все относительные положения и расстояния до Солнца и планет с точностью около одной миллионной. Однако все эти точные расстояния выражаются в астрономических единицах, т.е. через полусумму осей эллипса, по которому Земля обращается вокруг Солнца. Для предсказания положений небесных тел произвольный характер этой единицы расстояния не имеет значения, однако ученому в его работе нужны мерные рейки известной длины. Чтобы обеспечить корректировку траекторий космических аппаратов при полетах к другим телам Солнечной системы, также нужно знать расстояния с высокой точностью.

Еще несколько десятилетий назад астрономы могли измерять лишь

направление на объект. Благодаря радио появился новый тип измерений, пригодных как для калибровки астрономической единицы, так и для прямого определения расстояний до космических аппаратов, планет и спутников. При радиолокационных наблюдениях излучатель с антенной, имеющей огромные размеры, посылает короткие импульсы, например сантиметрового диапазона. Эти импульсы, отраженные от поверхности мишени, скажем от поверхности Луны, возвращаются назад, и по времени запаздывания можно найти расстояние. Скорость света фундаментальная постоянная, равная 299 792,5 км/с в вакууме. В расчеты нужно ввести небольшие поправки на меньшую скорость света в атмосфере и атмосферную рефракцию (преломление). Достижимая точность обычно меньше метра и даже может составлять несколько сантиметров.

В некоторых вариантах радиолокационного метода используются специальные отражатели, устанавливаемые на мишени, или активный ретранслятор, который принимает импульсы и немедленно переизлучает их обратно. Путем непрерывной передачи колебаний или импульсов, заданных или подсчитанных с помощью точных атомных стандартов частоты у источника или мишени, можно определять изменения расстояний, т.е. скорость. Электронные вычислительные машины способны считать волны или импульсы, суммировать их, что обеспечивает высокую точность измерений расстояний.

Измерения с помощью *лазера* или *лидара* (лазерного дальномера) также основаны на радиолокационном принципе, но проводятся в гораздо более коротковолновом оптическом диапазоне. Точность лазерных измерений в вакууме даже выше, чем радиолокационных измерений, но на световых импульсах сильнее сказываются атмосферные помехи. Уровень отраженного лазерного сигнала очень сильно возрастает при использовании *угловых отражателей*, установленных на мишенях, таких, например, как Луна или искусственные спутники. Угловой отражатель — это просто трехгранник, образованный ортогональными плоскостями, отражающими свет или радионизлучение. Мяч, световой пучок, радиоволна все отражается угловым отражателем в обратном направлении к источнику. Для лазерного углового отражателя не требуется такая высокая точность изготовления, как длялучших оптических поверхностей. Напротив, при высокой точности отраженный пучок будет слишком узким и не попадет обратно на источник. Например, телескоп, с которого послан пучок лазерного излучения на угловой отражатель «Аполлона», установленный на Луне, за время распространения света до Луны и обратно (2,5 с) сместится на 500 м или более. *Излишне узкий отраженный пучок может не попасть обратно в телескоп.*

При определении астрономической единицы классическими методами мы приходим к выводу, что наибольшим доступным эталоном длины является сама Земля; ее размеры известны довольно точно. Однако радиус Земли меньше 1/20 000 а.е.; угол, под которым виден радиус Земли с Солнца — *геоцентрический параллакс Солнца* (рис. 32), со-



Рис. 32

Параллакс Солнца — это угол, под которым радиус Земли, виден с Солнца. Геоцентрический параллакс любого небесного объекта — это соответствующий угол с вершиной в этом объекте. Определение звездного параллакса см. на рис. 50.

ставляет всего $8,8''$. Конечно, параллакс Солнца можно измерить при одновременных наблюдениях с двух разделенных большим расстоянием станций, но измеряемый угол настолько мал, что относительная ошибка определения довольно велика, поэтому по измерениям Солнца нельзя определить точное значение астрономической единицы.

Более совершенный метод измерения расстояния (в километрах) до какого-либо тела, которое близко подходит к Земле. Поскольку расстояние до этого тела в астрономических единицах для любого момента определяется на основании многих наблюдений и расчетов, можно, сравнивая эти два значения расстояния, найти астрономическую единицу, выраженную в километрах. Луна не годится для таких измерений, потому что расстояние до Луны нельзя вычислить в астрономических единицах без введения в расчеты массы Земли. Согласно Ньютону, движение Луны — это прежде всего мера земного притяжения. Марс в наиболее благоприятных условиях приближается к Земле только на $55\,700\,000$ км. Венера подходит ближе — на $42\,000\,000$ км, но в это время она близка к направлению на Солнце и трудна для любых измерений, за исключением радиолокационных (рис. 4). Наилучшим объектом для использования классического астрономического метода оказывается астероид Эрос.

Приятно отметить, что астероиды могут принести хоть какую-то пользу, так как, вообще говоря, они доставляют астрономам много хлопот. Вальтер Бааде (1893–1960), работавший в обсерваториях Маунт-Вилсон и Маунт-Паломар, называет их «небесными сорванцами». При прохождении Эроса на расстоянии 23 млн. км от Земли его геоцентрический параллакс примерно в семь раз больше параллакса Солнца, т. е. превосходит $1'$. Поэтому наблюдателям не надо проводить одновременные наблюдения из сильно удаленных точек земной поверхности — они могут работать самостоятельно. Каждый использует суточное вращение Земли (рис. 33) и фотографирует астероид вечером (а), в полночь (b) и утром (с). Положение Эроса на фоне звезд меняется из-за вращения Земли. Зная моменты каждой экспозиции и свое точное положение на Земле, наблюдатель может вычислить расстояние D до Эроса так же

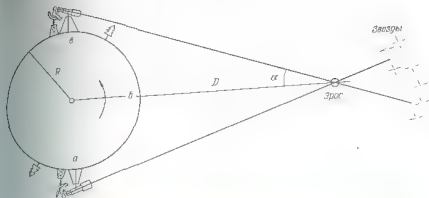


Рис. 33.

Измерение расстояния до Эроса. В результате суточного вращения Земли наблюдатель перемещается из точки *a* в точку *b*. Из этих двух положений он измеряет параллактический угол α Эроса и затем вычисляет расстояние *D*.

точно, как если бы наблюдения были проведены одновременно из различных точек земной поверхности.

Новая эпоха в измерениях астрономических расстояний началась в 1959 г., когда Прайс и его коллеги из Массачусетского технологического института впервые зарегистрировали радиолокационный сигнал, отраженный Венерой (рис. 34). Расстояние до Луны, определенное с учетом данных лазерной локации с помощью уголковых отражателей, установленных экипажем «Аполлона», известно теперь с точностью до нескольких сантиметров. Благодаря осуществлению программы космических исследований астрономическая единица определена сейчас с относительной точностью, примерно равной точности определения скорости света, т. е. лучше одной миллионной. Значение геоцентрического параллакса Солнца составляет $8,79418''$, это значение постоянно уточняется. Расчет и корректировка траекторий космических аппаратов достигли теперь высокой точности.

Определение массы Земли

Прежде чем взвешивать другие планеты, необходимо взвесить Землю. Древнегреческий ученый Архимед из Сиракуз (287–212 до н. э.) сказал: «Дайте мне точку опоры, и я переверну Землю». Таким образом он мог бы определить ее вес, наблюдая, как она поддается нажатию на рычаг. На самом деле нас интересует не вес Земли, а ее масса. Вес тела — это только сила притяжения его Землей, а масса — это мера количества вещества, содержащегося в нем. Одно из великих открытий Ньютона состоит в установлении пропорциональности массы и веса.



Рис. 34.

Миллстоунский радиотелескоп (диаметр 26 м), с помощью которого впервые был принят отраженный радиосигнал от Венеры (Фото Линкольновской лаборатории Массачусетского технологического института.)



Рис. 35. Притяжение грузика горой. Направление отвесной линии отклоняется от вертикали, что позволяет оценить силу притяжения грузика горой.

Возвращаясь к законам движения Ньютона, мы находим, что масса есть мера силы, необходимой для изменения скорости тела на определенную величину, или мера инерции. Чтобы разогнать за определенное время грузовик до заданной скорости, к нему надо приложить большую силу, чем к детской коляске, из-за различия масс этих тел. В пустом пространстве, далеко от притягивающих тел ни детская коляска, ни грузовик не имели бы веса, но массы их оставались бы неизменными.

Нам известно, с какой силой Земля притягивает единичную массу. Эта сила тяжести на поверхности удерживает нас на Земле и дает возможность взвешивать предметы. Поскольку сила тяжести пропорциональна массе Земли, единственной неизвестной величиной остается постоянная притяжения между двумя массами, т.е. *гравитационная постоянная*.

Устаревший метод определения этой постоянной состоит в измерении притяжения отвеса горой. Как показано на рис. 35, отвесная линия направлена не строго вертикально, а отклонена в сторону, потому что грузик притягивается горой. Силу, с которой гора действует на грузик, можно измерить, а массу горы оценить, определив ее размеры и зная химический состав. Поскольку расстояние до горы легко измерить,

можно вычислить гравитационную постоянную, а следовательно, и массу Земли.

Точность этого метода по сравнению с лабораторными крайне низка. С помощью чрезвычайно чувствительных приборов можно непосредственно измерить притяжение маленького шарика большим свинцовым шаром и определить значение гравитационной постоянной. Поскольку вес маленького шарика измеряется притяжением его Землей, массу Земли можно выразить через массу большого шара с помощью закона обратной пропорциональности силы притяжения квадрату расстояния. Если бы Землю можно было положить на чашку весов на поверхности, она весила бы 5 976 000 000 000 000 000 000 г.

Сила тяготения крайне слаба и становится заметной только тогда, когда масса притягивающего тела огромна. Предположим, мы сделаем шар из всего золота, добытого в мире, скажем 90 000 т. Если его поместить в космосе далеко от других тел, то человек, весящий на Земле 90 кг и попавший на этот шар, имел бы вес полграмма. Сверчок легко поднял бы его, а лягушка ударом лапки могла бы совсем отбросить его от золотого шара. Но люди обычно не так легко расстаются с золотом, поэтому можно сделать вывод, перефразируя Эзопа, что сила жадности значительно превышает силу гравитации.

Масса Солнца

Зная массу Земли, можно теперь вычислить массу Солнца. Земля постоянно падает на Солнце, отклоняясь от прямой, по которой она двигалась бы при отсутствии тяготения. Скорость падения составляет 6 мм/с. За секунду Земля перемещается приблизительно на 30 км. Чтобы заставить Землю падать с такой скоростью, Солнце должно иметь массу в 332 800 раз больше массы Земли, или около $1,989 \cdot 10^{27}$ т (1 989 000 000 000 000 000 000 000 000 т).

Зная массу Солнца, можно сделать некоторые интересные выводы о его строении. Средняя плотность равна всего лишь $1,41 \text{ г/см}^3$, для сравнения плотность Земли, состоящей из смеси камня и металлов, равна $5,5 \text{ г/см}^3$. Сила тяжести на поверхности Солнца в 28 раз больше, чем на поверхности Земли. Человек, весящий на Земле 90 кг, весил бы там около 3 т (правда, он испарился бы мгновенно при температуре 5500 °C). Достаточно знать всего три величины: массу, диаметр и поверхностную температуру, чтобы доказать, что Солнце является полностью газобразным. Чтобы обеспечить давление, необходимое для предотвращения сжатия к центру внешних газовых слоев, температура в центре должна достигать 15 млн. °C, а плотность должна быть в 160 раз больше плотности воды. Ни один химический элемент в любом слое Солнца не может находиться в твердом или жидком состоянии; даже тугоплавкий вольфрам, применяемый для изготовления нитей электрических лампочек накаливания, испарится на его относительно холодной поверхности.

Планеты и их спутники

Для определения масс планет, обладающих спутниками, в принципе используется такой же метод, как для определения массы Солнца. Сила притяжения планеты должна быть всегда точно равна центробежной силе, которая определяет скорость падения спутника в направлении планеты, чтобы спутник оставался на своей орбите. Зная эту силу притяжения, расстояние спутника от планеты и гравитационную постоянную, можно вычислить массу планеты. Мы знаем массу Нептуна, удаленного от нас на 4 500 млн км, с такой же точностью, как массу Луны, находящейся на среднем расстоянии всего 384 401 км (во всяком случае до применения радиолокаторов и лазеров).

Масса Луны

Массу спутника трудно определить, поскольку он обычно очень мал по сравнению со своей планетой. Воздействие Земли на движение Луны измеряется легко, но масса Луны так мала, что ее влияние на движение Земли невелико. Центр Земли движется вокруг их общего центра масс по очень малой орбите, похожей по форме на лунную. Если бы Землю и Луну можно было соединить невесомым стержнем и уравновесить на лезвии ножа при постоянной гравитации, то лезвие ножа поддерживало бы стержень в их центре масс (рис. 36). Именно эта точка движется по гладкой эллиптической орбите вокруг Солнца. Массу Луны можно измерить путем тщательных измерений расстояния общего центра масс от центра Земли (рис. 37). Отношение радиуса малой орбиты центра Земли вокруг центра масс к радиусу большей орбиты центра Луны и есть отношение масс Луны и Земли. Искусственные спутники, обращающиеся вокруг Луны, могут, конечно, обеспечить более точное определение ее массы, чем радиолокационные или лазерные измерения.

Центр масс находится на расстоянии около 4730 км от центра Земли, так что масса Луны составляет 1/81,30 (или 4730/384 400) массы Земли. С такой малой массой, только $73,5 \cdot 10^{-6} \text{ г}$, Луна это лишь крошечная песчинка в Солнечной системе, как капля воды в 200-литровой бочке или пресловутая муха на колесе. Земля только в 81 раз больше, но для нас, ее обитателей, это обстоятельство является самым важным.

Другие спутники

Только немногие большие спутники Юпитера и Сатурна создают гравитационные эффекты, достаточные для определения их масс. Взаимные возмущения спутников также позволяют измерить их массы по отношению к массе планеты. Космические аппараты, пролетающие вблизи них, также испытывают возмущения, что позволяет еще точнее определить массы спутников. Четыре ярких спутника Юпитера и Титан спутник Сатурна сравнимы по массе с Луной или несколько мас-



Рис 36 Центр тяжести находится в точке равновесия. Рисунок вычерчен для двух шаров равной плотности, соединенных невесомым стержнем.

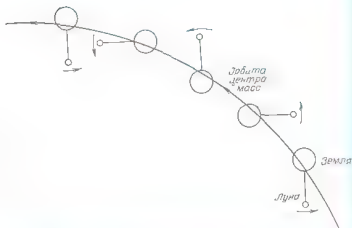


Рис 37 Движение Земли вокруг центра масс Земли и Луны. Центр масс движется по гладкому эллипсу вокруг Солнца. Размеры преувеличены, но относительные положения центра Земли и центра масс правильны.

сивиссе. Массы Ганимеда (спутника Юпитера) и, вероятно, Тритона (спутника Нептуна) примерно вдвое больше лунной, хотя масса Тритона определена еще недостаточно надежно.

Радиусы, массы, плотности и другие параметры спутников приведены в приложении 3. Относительные массы спутников, изображенных в виде сфер равной плотности, представлены на рис. 38. Для спутников, массы которых не известны, вместо массы даны их измеренные диаметры, эти случаи отмечены знаками вопроса. Подобным же образом отмечены случаи, когда диаметры оценены только по яркости. Диапазон масс столь велик, что оказалось невозможным изобразить некоторые тела в масштабе схемы. В этих случаях масштаб был увеличен в 10 и 100 раз.

Судя по плотности Луны ($3,3 \text{ г см}^3$), она сложена скальными породами. Из больших спутников только у Ио плотность выше и равна $3,5 \text{ г см}^3$. Плотности галилеевых спутников Юпитера убывают с рас-

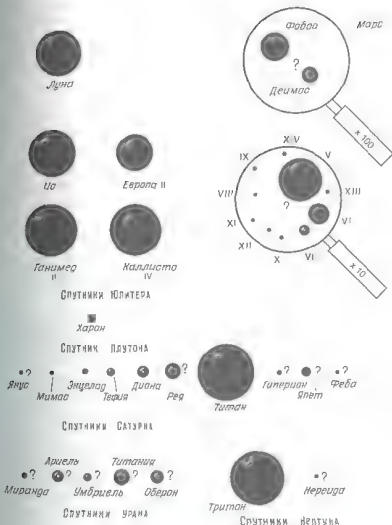


Рис 38

Массы спутников планет Солнечной системы, изображенные в виде сфер равной плотности. Если масса объекта определена плохо, около изображения стоит знак вопроса. Очень малые тела показаны в масштабе, увеличенном в 100 раз для спутников Марса и в 10 раз для спутников Юпитера, чтобы показать отношения из реальных размеров (вверху справа). Спутники расположены в порядке возрастания их расстояния от соответствующей планеты. Другие данные о спутниках см. в приложении 3.

стоянием от планеты Европа $3,0 \text{ г см}^3$. Ганимед $1,93 \text{ г см}^3$. Каллисто $1,79 \text{ г см}^3$. Ганимед и Каллисто, Титан и Тритон сравнимы по диаметру с Меркурием, но плотность их гораздо ниже. Спутники с плотностями, заметно меньшими 3 г см^3 , должны содержать значительную долю воды и льда, так как лишь очень немногие минералы имеют такую низкую плотность.

Массы планет

Массы планет, у которых нет спутников, были вычислены классическим путем только по наблюдаемым возмущениям, вызываемым ими в движениях других планет, методом, подобным использованному для предсказания положений Нептуна и Плутона. Венера, например, очень близко подходит к Земле, Марсу и Меркурию и возмущает их движение. В свою очередь движение Венеры испытывает возмущения под действием притяжения Земли, Марса и Меркурия. Численные расчеты масс Венеры и Меркурия из наблюдений их движения исключительно сложны. Искусственные спутники этих планет и пролетные космические аппараты позволяют заметно уточнить массы планет, а также наши сведения об их форме и топографии поверхности. Кроме того, как мы увидим ниже, космические аппараты, выведенные на орбиты вокруг планет, могут дать сведения о внутреннем строении планет.

Меркурий отличается высокой плотностью, $5,44 \text{ г см}^3$, промежуточной между плотностями Венеры ($5,25 \text{ г см}^3$) и Земли ($5,52 \text{ г см}^3$) — самой плотной планеты. Диаметр Меркурия только в 1,4 раза больше диаметра Луны, а плотность в 1,62 раза выше плотности Луны, это указывает на существенные различия в их химическом составе.

Точные значения массы и плотности Плутона будут не известны, до тех пор пока не будет надежно подтверждено существование и проведены наблюдения его спутника. Плутон, как указывалось выше, имеет размеры, близкие к размерам Луны, и содержит значительные количества льда.

На рис. 39 шарами равной плотности показаны массы планет. Напомним, для сравнения с рис. 38, что Меркурий превосходит по массе Луну и другие большие спутники, хотя диаметры некоторых из них пре-



Рис. 39

Массы планет, представленные сферами равной плотности. Диаметр Солнца в масштабе рисунка превышал бы диаметр Юпитера в 10 раз, Солнце заняло бы всю страницу

вышают диаметр Меркурия. Поэтому последовательность масс от наименьшего спутника, Деймоса, до наибольшей планеты, Юпитера, достаточно равномерна. Можно было бы продолжить эту последовательность масс к меньшим телам — астероидам и метеоритам, не нарушая ее непрерывности. В последовательности диаметров при переходе от Юпитера к Солнцу наблюдается десятикратный перепад, так как Солнце в тысячу раз массивнее Юпитера.

Было бы излишним обременять рассказ описанием всех других остроумных методов, которые применялись при вычислениях и оценках масс планет, спутников, комет и астероидов. Всякий раз, когда два тела, в том числе космический аппарат, наблюдаются при сближении, достаточно для обнаружения возмущений одного другим, можно получить дополнительную информацию об их массах. Если при близком прохождении не наблюдается каких-либо изменений в движении, то можно найти верхний предел масс. Так, когда комета Брука в 1886 г. пересекла орбиты внутренних спутников Юпитера, ее период изменился с 29 лет до 7 лет, но никаких нарушений движения спутников не было отмечено. Следовательно, масса кометы должна быть меньше 0,0001 массы Земли, в противном случае она вызвала бы поддающиеся измерению возмущения.

В заключение этих двух глав, посвященных закону всемирного тяготения Ньютона, заметим, что весь фундамент астрономии покоится на приложениях этого закона, так же как и движения в космическом пространстве созданных человеком аппаратов. За пределами Солнечной системы, в далеких областях Вселенной, этот универсальный закон также остается ключевым для решения многих важнейших проблем. Почти никаких вычислений массы нельзя сделать без обращения к этому закону. Поправка, вводимая общей теорией относительности Эйнштейна, ощутима в случае движения Меркурия под действием сильного притяжения Солнца. Только для него эта поправка достаточно велика, чтобы ее можно было обнаружить при современных методах наблюдений движения планетных тел. В будущем с увеличением точности наблюдений можно ожидать выявления других случаев. Поскольку не существует абсолютной истины, причем из каждого нового вывода можно сделать более общие заключения, простота и совершенство закона Ньютона, который дает такие точные результаты, вызывает восхищение. Но для развития науки ученый должен выявлять маленькие погрешности даже в совершенных законах и теориях.

5

Земля

Земля кажется нам такой огромной, такой надежной и так много значит для нас, что мы не замечаем ее второстепенного положения в семье планет. Единственное слабое утешение состоит в том, что Земля наибольшая из планет земной группы. К тому же она обладает атмосферой средней мощности, значительная часть земной поверхности покрыта тонким неоднородным слоем воды, а вокруг нее обращается величественный спутник, диаметр которого равен четверти земного диаметра. Однако этих аргументов вряд ли достаточно для того, чтобы поддерживать наше космическое самомнение. Крошечная по астрономическим масштабам, Земля — это наша родная планета, и поэтому она заслуживает самого тщательного изучения.

До эпохи искусственных спутников темная часть молодой Луны служила наилучшим «космическим зеркалом» для изучения Земли (рис. 40). Вблизи новолуния, когда Земля, Луна и Солнце лежат почти на одной прямой, солнечный свет, отраженный Землей, освещает кочную полусферу Луны, не освещенную никаким другим источником. Измерения освещенности, создаваемой Землей на Луне (спецетного света), указывают, что Земля хорошо отражает свет, как и другие планеты, обладающие атмосферами. Вследствие переменности облачного покрова доля солнечного света, отраженного Землей, — ее альbedo — меняется в два раза, а его среднее значение составляет 0,35.

На снимках, полученных с ракет (рис. 41), американских метеорологических спутников «Тайрос» и других космических аппаратов, мы видим Землю со стороны (рис. 42). Как и ожидалось, прежде всего бросаются в глаза облачные образования. Большая протяженность некоторых облачных структур удивила метеорологов; в распределении облачности отчетливо выявляются мощные атмосферные фронты. Благодаря метеорологическим спутникам, передающим на землю большой объем данных о состоянии атмосферы в глобальных масштабах, предсказание погоды поставлено на более строгую научную основу.

Гипотетический космический пришелец, вооруженный хорошим телескопом, еще на некотором расстоянии от Земли мог бы отличить кон-

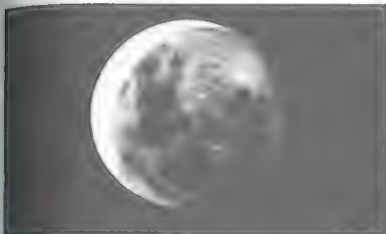


Рис. 40. Пенящийся свет Луны в ранней фазе. Север внизу (Фото Иерусалимской обсерватории.)

тиненты от океанов и распознать полярные шапки. Зимой в северном полушарии он увидел бы северную полярную шапку, покрывающую огромную площадь и простирающуюся почти на 50° от полюса к экватору, тогда как летом эта область была бы ограничена только несколькими градусами по широте. Он установил бы, что южная граница северной полярной шапки очень изрезана, особенно там, где она омывается океанами. Южная полярная шапка более стабильна, так как площадь суши в южном полушарии гораздо меньше. Внимательный наблюдатель мог бы обнаружить сезонные изменения цвета в умеренных географических широтах от зеленого до коричневого, а затем черного и белого и объяснить их причину.

Наш гипотетический астроном мог бы со стороны обнаружить одну особенность, свойственную только нашей планете. Он увидел бы прямое отражение Солнца в земных океанах (рис. 43). Это явление повергло бы его в изумление: вряд ли где-нибудь еще он мог встретить такие большие массы воды. Возможно, он предположил бы, что отражение происходит от гладкой кристаллической поверхности, подобно древним астрономам, которые считали Луну идеальной кристаллической сферой.

Одна из записей, сделанных внеземным астрономом в журнале наблюдений, гласила бы, что ось вращения Земли не перпендикулярна эклиптике — плоскости земной орбиты. В результате длительных и тщательных наблюдений он установил бы, что экватор наклонен к плоскости эклиптики на $23,5^\circ$. Этим наклоном экватора к эклиптике он объяснил бы сезонные изменения цвета в умеренных поясах и изменение размеров полярных шапок.

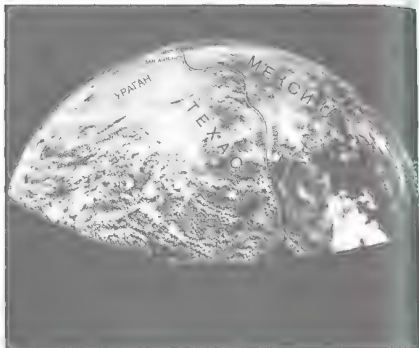


Рис 41 Юго-восточная часть Северной Америки, сфотографированная с ракеты «Аурора» ВМС США с высоты 160 км (Фото ВМС США.)

Он нашел бы, что при движении Земли вокруг Солнца направление ее оси вращения остается неизменным в пространстве (рис 44). Когда северный полюс обращен в сторону Солнца (положение *а*), северное полушарие получает больше солнечного света, чем южное. Полюс освещается круглосуточно (полярный день), долгота дня всюду к северу от экватора больше, чем на таких же широтах в южном полушарии. К тому же солнечные лучи падают почти перпендикулярно поверхности, так что данная область получает больше тепла и света в дневное время (рис. 45) при большей продолжительности дня.

Через четверть периода обращения вокруг Солнца (спустя 3 месяца) Земля переместится в положение *б*: здесь долгота дня и ночи будет одинакова на всем земном шаре. Через половину периода (6 месяцев) южное полушарие будет нагреваться, а северное остывать, причем на северном полюсе будет полярная ночь. Если наш астроном хотя бы мало-мальски сообразителен (а наверняка так оно и есть — ведь он же астроном!), он, конечно, догадался бы, почему происходят изменения цвета в обоих полушариях и почему изменяются полярные шапки. Он

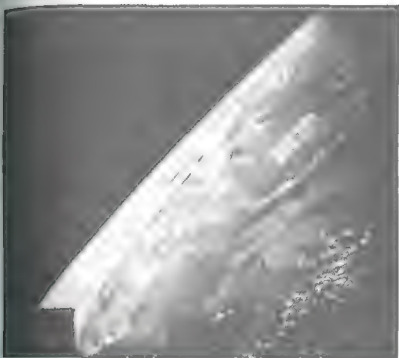


Рис. 42 Вид Центральной Африки с озером Рудольфа в Кении с космического корабля «Меркурий-4» (с любезного разрешения НАСА США)

бы сформулировал свою мысль так: «Ясно, что на планете Земля должны происходить сложные химические и физические процессы, которые стимулируются непосредственно солнечным теплом. Области темно-синего цвета, покрывающие большую часть поверхности планеты, изменяются только при очень сильных колебаниях тепловых потоков, тогда как области, приобретающие зеленую окраску с повышением температуры, реагируют на значительно меньшие колебания. Постоянные полярные шапки, вероятно, подобны областям, приобретающим зеленую окраску с повышением температуры, но они никогда не нагреваются достаточно сильно, чтобы этот процесс начался». Наш внеземной ученый друг мог бы продолжить: «Поэтому мы должны сделать вывод, что более устойчивые темно-синие области очень хорошо запасают тепло по сравнению с теми неустойчивыми областями, которые реагируют на небольшие изменения теплового потока...».

Самое теплое время года не совпадает с моментом наибольшей долготы дня и максимального освещения поверхности солнечными лу-

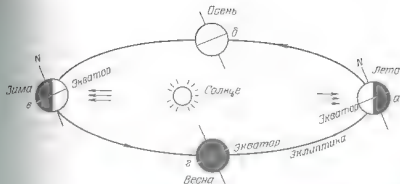


Рис. 44. Положение Земли на орбите в различные сезоны для северного полушария. В южном полушарии сезоны противоположные.

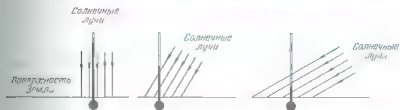


Рис. 45. Поверхность земли нагревается эффективнее тогда, когда лучи Солнца падают на нее перпендикулярно.

шарии и через афелий (наиболее удаленную от Солнца точку орбиты) в середине лета. Казалось бы, вследствие этого сезонные различия в северном полушарии должны слегка смягчиться, а в южном полушарии диапазон температур должен быть более резко выражен. В действительности сезонные колебания температуры в южном полушарии меньше, чем в северном. Дело в том, что океаны оказывают заметное влияние на изменения температуры атмосферы, уменьшая их, а отношение площади поверхности, покрытой водой, к площади суши в южном полушарии значительно больше, чем в северном.

Обычно говорят, что Земля - шар, но в действительности ее форма отклоняется от идеальной сферы. Тщательные измерения показывают, что экваториальный диаметр на 43 км (1/298 долю) больше полярного диаметра, т.е. экваториальное сечение имеет вздутие. Эта деформация возникла не случайно, Земля не всегда имела такую форму. Собственная сила гравитации Земли достаточно велика, чтобы стянуть вещество, из которого она состоит, в почти идеальную сферу. Но этому препятствует вращение с периодом 24 часа, так как обусловленная им центро-

бежная сила, увеличивает экваториальный диаметр и уменьшает полярный, что и приводит к образованию наблюдаемого экваториального вздутия. Если бы породы, из которых сложена Земля, были слишком жесткими, чтобы принять форму, предписываемую вращением, то для компенсации центробежной силы вода в океанах стекала бы к экватору (рис. 46, а). Поскольку океаны здесь не намного глубже, чем всюду на земном шаре, мы должны сделать вывод, что «твердая» Земля подчиняется действию центробежной силы (рис. 46, б).

Существование у Земли экваториального вздутия ведет, например, к следующему парадоксу: «река Миссисипи течет в гору», но с ним связано одно очень важное для астрономов явление. Это явление, называемое *прецессией* или *предварением равноденствий*, было открыто еще в древности и было объяснено Ньютоном. Прецессия состоит в том, что направление земной оси не остается неизменным в пространстве в течение длительных интервалов времени, а медленно перемещается во круг полуса эклиптики с периодом около 26 000 лет. Угол между экватором и эклипкой при этом почти не меняется, хотя земная ось поворачивается подобно оси вращающегося волчка (рис. 47). Аналогия почти полная, поскольку Земля действительно ведет себя как огромный волчок.

Ось волчка соответствует полярной оси Земли, коническое тело волчка — самой Земле, ободок экваториальному вздутию. Вследствие наклона оси вращения к эклиптике вздутие всегда притягивается Луной, Солнцем и планетами, которые стремятся повернуть его, а следовательно и экватор, в плоскость эклиптики. На обычный волчок сила гравитации действует иначе, стремясь опрокинуть ось вращения. В обоих случаях опрокидывающей силе не удается изменить наклон вращающегося тела, угол между осью вращения и вектором силы остается постоянным, а ось прецессирует (рис. 47). Характерное свойство вращающегося тела противодействовать приложенной к оси вращения силе используется в гироскопах, устройствах, являющихся наиболее важной частью таких приборов, как гироскоп, гиросtabilизатор и гиросвертикаль, устанавливаемых на кораблях, самолетах, ракетах и космических аппаратах. В настоящее время гироскопические устройства поразительно точны, и если их поместить на орбите, то они могут использоваться как часы при вращении Земли под ними. Современные гироскопы могут сохранять ориентацию с точностью порядка одной миллионной.

Прецессия — это вовсе не чисто академическая проблема, поскольку она сильно усложняет составление календаря. Взглянув еще раз на рис. 44, нетрудно заметить, что наступление того или иного сезона зависит от направления земной оси. Когда Земля находится в точке весеннего или осеннего равноденствия (в положении б или г), т.е. на линии пересечения плоскостей экватора и эклиптики, наступают весна или осень. Прецессия — это движение точки весеннего равноденствия с востока на запад относительно звезд, т.е. по часовой стрелке при наблюдении с северного полюса. Если бы год определялся как один оборот Земли вокруг Солнца по отношению к звездам, то скоро времена года

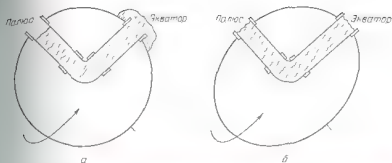


Рис 46

« идеалью твердая сферическая Земля. При ее вращении вода в трубе должна стекать от полюса к экватору. б реальная Земля с экваториальным вздутием. Уровень воды у полюса и экватора одинаков

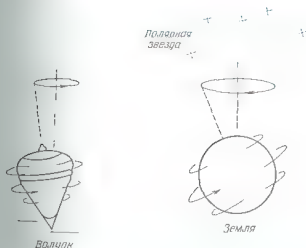


Рис 47

Волчок и Земля. Прецессия в обоих случаях возникает под действием сил, которые стремятся изменить направление оси вращения.

начали бы наступать в совсем другие месяцы и за несколько тысяч лет несоответствие с календарем стало бы очень сильным. Чтобы обойти эту трудность, календарный, или тропический, год измеряется между двумя прохождением Солнца через точку весеннего равноденствия. Тропический год позволяет сохранить соответствие календаря сезонам. Однако он короче истинного, сидерического, года приблизительно на

20 мин. Введение в календарь високосного года связано с тем, что тропический год равен не целому числу суток, а 365 сут 5 ч 48 мин 45,6 с.

Еще в древности астрономы обнаружили, что положение звезд на небе в один и те же сезоны медленно меняется со временем, а также заметили более очевидное явление перемещения северного полюса среди звезд. Полярная звезда, в настоящее время находящаяся близ полюса мира, будет только временно указывать направление на полюс (см. рис. 200, звездная карта), хотя смещение полюса мира за время жизни человека пренебрежимо мало. Во времена сооружения египетских пирамид направление на полюс мира указывала звезда α Дракона, удаленная от Полярной звезды на угол около 25°. Южный Крест (созвездие южного неба) в ту эпоху можно было видеть с большей территории США, чем теперь. Полный оборот по малому кругу радиусом 23,5° полюс мира совершает за мифологический «Год богов». Для богов человеческая жизнь кажется мимолетной. Период прецессии близок к 70 лет $\times$ 365 лет.

Большая часть силы, которая действует на экваториальное возмущение и вызывает прецессию, обусловлена притяжением Луны, поэтому, в соответствии с третьим законом Ньютона, возмущение в свою очередь должно оказывать влияние на движение Луны. Так оно и есть, причем основной эффект состоит во вращении плоскости лунной орбиты (к западу, или в обратном направлении), почти так же, как действует прецессия, но с периодом всего лишь около 19 лет. Экваториальное возмущение оказывает сильное влияние на движение искусственных спутников Земли с малым радиусом орбиты, причем период поворота их орбитальных плоскостей исчисляется уже не годами, а неделями. Хотя эти движения сильно усложняют расчеты орбит спутников, они привели к новым очень интересным результатам. Прежде всего удалось гораздо точнее определить сплюснутость Земли и, кроме того, была найдена гравитационная асимметрия Земли относительно экватора. Земля имеет слегка грушевидную форму, причем «черешок груши» располагается у северного полюса (рис. 48), отклонение достигает 16 м. Грушевидная форма частично объясняется существованием пары расположенных в противоположных направлениях гравитационных «впадин» в северном полушарии близ Индии и в океане у западного побережья Северной Америки. Глубина этих «впадин» достигает 75 м, они определяются по вариациям плотности в земной коре. Возможно, они служат мерой эффектов, обусловленных течениями в «твердой Земле» (гл. 6).

Вследствие прецессии возникает много более серьезных трудностей, чем связанные с изменением продолжительности сидерического года. Так, астрономы вынуждены проводить измерения небесных тел, естественных или искусственных, относительно опорной системы координат, которая не остается неподвижной. В данной ситуации астронома можно сравнить с воображаемым картографом, который обнаружил, что все континенты и острова на земном шаре перемещаются (как мы увидим ниже, они действительно дрейфуют со скоростями несколько сантиметров в год). Чтобы установить широту и долготу какого-либо

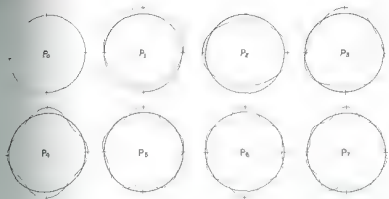


Рис. 48

Члены (гармоники) бесконечного ряда, описывающего математически истинную фигуру Земли. Член P_1 представляет грушевидную форму Земли, член P_2 описывает сжатие Земли. По наблюдениям искусственных спутников Земли найдены десятки членов этого ряда. Северный полюс вверху.

места на одном из них, нужно привязать расчеты к определенному моменту времени. В астрономии исходной точкой для практических измерений служит точка весеннего равноденствия, а фундаментальной плоскостью — экватор, но они смещаются вследствие прецессии. Поэтому каждое публикуемое измерение звезды, планеты или спутника должно сопровождаться указанием эпохи равноденствия и экватора, к которым относятся измерения.

Движением Земли обусловлены еще два усложнения в задаче определения направлений на небе. Одно из них связано с малыми короткопериодическими колебательными движениями земной оси среди звезд, налагающимися на ее прецессионное движение. Это явление называется *нутацией* и связано с особенностями движения Луны и меняющимся вследствие этого притяжением экваториального вздутия. Период колебаний земной оси вследствие нутации составляет около 19 лет. Только с помощью сложнейшей математической теории астрономам удается вычислять все малые возмущения, которые в сумме дают прецессию и нутацию. Профессор Мультош (1872–1952) сказал: «Никакими словами нельзя одновременно выразить сложность и красоту математической теории нутации».

Вторая трудность в наблюдениях небесных тел обусловлена явлением, называемым *абerrацией света*. Абerrацию впервые наблюдал и объяснил в 1728 г. английский астроном Джеймс Брайдей (1693–1762). История этого открытия является одним из многих волнующих примеров научных исследований, когда при поисках одного явления неожиданно открывалось другое. Брайдей пытался наблюдать паралактическое смещение звезд вследствие движения Земли по орбите, чтобы доказать

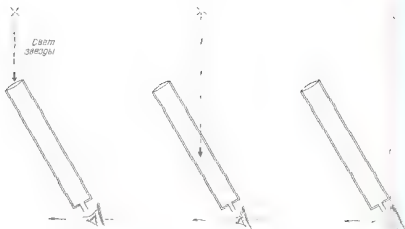


Рис. 49 Абберрация света. Движущемуся наблюдателю приходится наклонять свой телескоп в направлении движения, чтобы луч света попал точно в центр трубы.

ее обращение вокруг Солнца. Он установил телескоп очень жестко в хорошо изготовленной неподвижной трубе, чтобы ежедневно регистрировать прохождение определенной звезды. Если Земля действительно обращается вокруг Солнца, то в течение года положение звезды при каждом прохождении должно слегка изменяться.

Несмотря на тщательные наблюдения ему не удалось получить прямого показательства движения Земли, но были обнаружены смещения звезды, не совпадающие по фазе с ожидавшимися Брайлем вследствие параллакса. В конечном счете он объяснил новое явление суммарным эффектом движения Земли и конечности скорости света. Это объяснение будто бы пришло Брайлю в голову, когда он плыл по Темзе. Направление флага на вершине мачты судна менялось, когда изменялся курс судна, несмотря на то что ветер все время дул с одного направления. Пусть ветер это свет, идущий от звезды, судно движущаяся Земля, а флюгер — телескоп, указывающий видимое направление на звезду, откуда следует, что положение звезды на небе должно зависеть от движения Земли. Как видно на рис. 49, где показаны телескоп и approaching от звезды луч света, чтобы луч света попал в трубу телескопа, необходимо наклонить телескоп вперед по направлению движения Земли.

Хорошим примером абберрации, известным нам из повседневной жизни, служат косые следы капель дождя на боковых стеклах движущегося автомобиля. Капли, которые падают вертикально, оставляют сильно наклоненные следы. При падении света звезды на Землю изменение его направления вследствие абберрации мало, около $20''$. Однако попра-

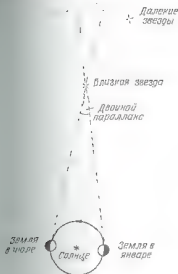


Рис. 50.

Параллакс звезды — это угол, под которым со звезды видна большая полуось земной орбиты. На графике показан двойной параллакс. Можно измерить параллаксы только ближайших звезд, поскольку для звезд, находящихся на больших расстояниях, он недоступен измерениям.

ку на этот эффект необходимо вносить во все наблюдения небесных тел. Скорость движения Земли вокруг Солнца составляет всего 29,8 км/с, а скорость света равна 299 792 км/с, отношение этих скоростей определяет абберационный угол (его тангенс).

Примечательно, что Брайлей, открывший также нутацию, не достиг своей первоначальной цели прямого доказательства движения Земли по измерениям параллактического смещения звезды. Это удалось сделать лишь 100 лет спустя, когда телескоп был значительно усовершенствован. Однако найденное Брайлем доказательство обращения Земли вокруг Солнца было вполне надежным, хотя он осуществил это совсем другим методом, отличавшимся от задуманного.

До 1838 г. из наблюдений не удавалось получить прямых свидетельств обращения Земли вокруг Солнца. В 1838 г. Фридрих Вильгельм Бессель (1784–1846) измерил малое смещение звезды 61 Лебеда по изменению ее положения на небесной сфере при наблюдениях из противоположных точек земной орбиты. Параллакс звезды (рис. 50) составил 0,3", т. е. угол, под которым видна полуось земной орбиты с расстояния 61 Лебеда, равен 0,3". Как теперь известно, ближайшая к Солнцу звезда — Проксима Центавра; ее параллакс равен 0,762". Отсюда можно сразу же вычислить расстояние в километрах:

$$(1/0,762) \times 206\,265 \times 149\,597\,000 \text{ км} = 4,05 \cdot 10^{13} \text{ км}$$

Такое огромное расстояние трудно представить. Удобнее выразить его через световой год, т. е. расстояние, которое свет (распространяющийся со скоростью 299 792 км/с) проходит за год. Свет от Луны приходит

к нам через 1,3 с. от Солнца через 8⁵ мин. а от Проксимы Центавра свет идет 4 года! Гораздо дальше находятся даже яркие звезды, видимые невооруженным глазом. Самые далекие звезды, которые можно сфотографировать с помощью 5-метрового телескопа обсерватории Маунт-Паломар, удалены от нас на сотни миллионов световых лет, а слабейшие гигантские скопления звезд *галактики* находятся на расстоянии тысяч миллионов световых лет. Вряд ли стоит осуждать древних астрономов за то, что они не могли предсказать таких колоссальных расстояний.

В настоящее время движение Земли рассматривается не как торжественное шествие массивного тела через космическое пространство, а как естественное движение небольшой планеты в искривленном пространстве-времени вокруг заряженной звезды. В космических масштабах Земля выглядит немного больше дылочки. Для нас, ее обитателей, Земля — это дом, родная планета, которую мы с полным основанием считаем самым главным объектом во Вселенной. В следующей главе мы увидим, как прекрасен наш дом.

6

Земля как обитель жизни

Большинство обитателей Земли принимают свою планету такой, ка-
кая она есть. Конечно, люди ворчат на плохую погоду, жалуются на
плохие урожаи или стихийные бедствия, но обычно не проводят крити-
ческого анализа. Когда-то такое отношение было оправдано. Ведь у че-
ловека не было выбора: родившись на Земле он должен был принимать
ее гостеприимство. Теперь, когда началась эпоха освоения космического
пространства, уместно спросить: не стоит ли переселиться на другую
планету или обосноваться в космическом корабле? Окинем же нашу
родную планету критическим взглядом. Посмотрим, в какой степени
безопасны мы на Земле, какие опасности таятся в космосе и какие уни-
кальные условия необходимы для поддержания хрупкого творения, ко-
торое мы называем жизнью.

Сначала рассмотрим, что угрожает нам извне. Для существования
жизни, как известно, температура время от времени должна быть выше
точки замерзания воды, но никогда не должна превосходить точку кипе-
ния. Это ограничение температурных условий более сильное, чем кажется
на первый взгляд, так как шкала температур начинается с абсолют-
ного нуля (-273°C) и продолжается до бесконечности. Самые высокие
температуры, непосредственно измеренные у звезд, достигают несколь-
ких сотен тысяч градусов, а в недрах звезд температура составляет мил-
лионы градусов.

Солнце снабжает Землю теплом, необходимым для поддержания ее
температуры в подходящем диапазоне, охватывающем всего около
 100° , не нагревая ее чрезмерно. С помощью кропотливых исследований
ученые установили, что в прошлом на протяжении сотен миллионов лет
поток энергии Солнца не подвергался сильным изменениям. Источни-
ком энергии Солнца является не обычный процесс горения, а реакции
термоядерного синтеза, превращающие водород в гелий, или более
сложные процессы с участием углерода и азота. Согласно теоретическим
расчетам, светимость Солнца за последние несколько миллиардов лет
увеличилась на несколько процентов. Можно ожидать, что рост будет
продолжаться в таком же темпе, но за миллион лет он будет пренебре-



Рис 51 Метеоры, перескакивающие поле зрения неподвижного телескопа
(Фото И. С. Астаповича)

жимо мал. Следует, однако, иметь в виду, что небольшое изменение всего лишь на несколько процентов количества тепла, получаемого Землей от Солнца, приведет к сильным изменениям земного климата.

Не исключено, что подобные вариации потока солнечного излучения ответственны за оледенения, происходившие приблизительно каждые сто миллионов лет. Мы живем в такой геологический период, когда льды времени отступили. Оледенения, вероятно, не представляют угрозы для жизни на Земле, хотя и способны превратить некоторые области в необитаемые на длительное время.

Земная атмосфера играет чрезвычайно важную роль в поддержании температуры в допустимых пределах. Она действует как одеяло, не допуская слишком сильного повышения температуры днем и чрезмерного понижения температуры ночью. Подобно стеклу, которое, пропуская видимый свет Солнца в оранжевую и препятствуя выходу теплового, и в далекого инфракрасного, излучения наружу, позволяет поддерживать в оранжевом более высокую температуру, чем снаружи, атмосфера поддерживает тепловой баланс у поверхности Земли.

Мощная атмосфера Венеры удерживает больше солнечного тепла, поэтому температура ее поверхности поднимается гораздо выше точки кипения воды. Нам повезло, что Земля избежала такой судьбы: ведь Земля и Венера во многом похожи друг на друга. На Луне, т.е. без атмосферы, температура в полдень выше точки кипения воды, а ночью падает до -162°C , т.е. гораздо ниже точки плавления «сухого льда».



Рис 52 Зодиакальный свет, тонкая вертикальная черная линия имеет инструментальное происхождение (Фото Д. Блэкуелла и М. Ингхэма с высоты более 5 км в Боливии)

В космическом пространстве, вне земной атмосферы и далеко за ее пределами температура в тени приближается к абсолютному нулю. Ясно, что терморегулирующая атмосфера необходима для существования любой активной формы жизни.

Атмосфера предохраняет нас не только от огромных колебаний температур. Это неоценимая защита от метеорных тел, непрерывно бомбардирующих Землю из межпланетного пространства (рис 51). Метеорные тела сталкиваются с Землей со скоростями до 72 км/с. Сила удара метеорной частицы массой всего 0,001 г, несущейся с такой скоростью, такая же, как пули пистолета 45 калибра при выстреле в упор. Хотя размеры частицы не больше пылинки и меньше средней песчинки, она все же опасна для человека. Ежедневно в земную атмосферу вторгаются миллиарды частиц, создавая слабые метеоры, которые можно видеть только в телескоп или с помощью радиолокатора. Слабейшие метеоры, видимые невооруженным глазом, в несколько раз крупнее.

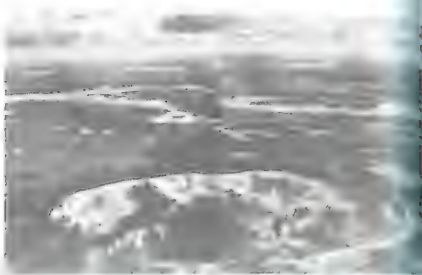


Рис. 53. Квебекский метеоритный кратер диаметром приблизительно 5 км. (Фото BBC Канады, с которого разрешения обсерватории Доминион)

Большинство этих тел быстро испаряется в атмосфере из-за сопротивления воздуха.

Крошечные метеорные частицы, движущиеся в космическом пространстве вблизи плоскости земной орбиты, рассеивая солнечный свет, создают сияние, видимое вблизи Солнца утром незадолго до восхода Солнца и вечером вскоре после его захода. Поскольку метеорная пыль концентрируется к плоскости эклиптики, проходящей через зодиакальные созвездия, это сияние называется *зодиакальным светом* (рис. 52).

Наше счастье, что мы защищены от метеорных тел, но все равно некоторые из них, наиболее массивные, способны достичь поверхности Земли и вызвать разрушения. Большой метеоритный кратер в Аризоне (США) образовался около 24 000 лет назад при взрыве громадного тела. Диаметр этого кратера больше километра, и даже сейчас его глубина достигает приблизительно 200 м. несмотря на его заполнение породами вследствие эрозии. Квебекский кратер (рис. 53) в Канаде много больше Аризонского. Вокруг Аризонского кратера были в изобилии найдены мелкие железные метеориты, но не удалось обнаружить ни одного крупного осколка ни путем бурения, ни с помощью радиодетектирования. Железные метеорит взорвался при ударе о землю с силой, намного превышающей силу любых известных взрывов. Сохранились только «шрапнель» и кратер, чтобы поведать нам эту историю.

Гунгусский метеорит 1908 г. взорвался с такой силой, что деревья

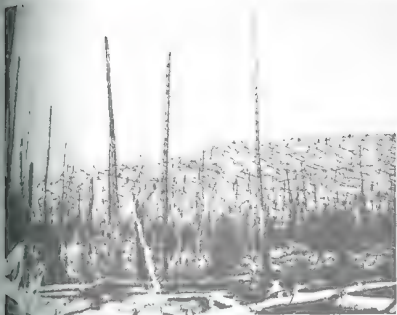


Рис. 54 В разгар метеоритного дождя Тунгусского метеорита, 1908 г. на расстоянии 30 км от места взрыва сфотографирован огненный шар

были повалены на расстоянии до 30 км от места взрыва (рис. 54). В этом случае упавшее тело было почти наверняка обломком кометы малой плотности, разрушившимся в атмосфере на высоте нескольких километров. Рассказы, будто событие 1908 г. на Подкаменной Тунгуске связано с черной дырой или взорвавшимся космическим кораблем с ядерным двигателем, опровергаются прямыми свидетельствами. В 1947 г. в СССР на Дальнем Востоке упал большой железный (Сихотэ-Алинский) метеорит, образовавший большое число кратеров. В 1972 г. поблизости от западного побережья Северной Америки, на расстоянии всего лишь 50 км, пронеслось тело массой 100 т или более. Сотни отдыхающих в ряде мест США и Канады среди белого дня сфотографировали этот огненный шар.

Если в текущем столетии были зарегистрированы падения двух крупных метеоритов на суше и одно падение вблизи побережья, то над океаном таких событий, которые остались незамеченными, должно быть в несколько раз больше. Падение любого из них на большой город было бы катастрофой, сравнимой со взрывом ядерной бомбы, погибли бы от десяти тысяч до миллиона человек. На наше счастье подобные разрушительные метеориты крайне редки, но всегда существует

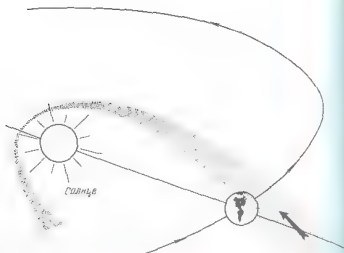


Рис. 55 Рой остатков кометы, движущийся по эллиптической орбите вокруг Солнца и вызывающий метеорные дожди при пересечении потока Землей

незначительная вероятность столкновения Земли с таким телом (рис. 55). В среднем человек может оказаться жертвой метеорита раз в несколько сотен лет.

Исчезновение динозавров в конце мелового периода 65 млн. лет назад, а также окончание других геологических периодов могло быть следствием падения на Землю тел, размерами с астероид. Л. Альварес и его коллеги из Калифорнийского университета обнаружили, что в осадках позднемелового периода содержание сравнительно редкого элемента иридия в 30–160 раз выше, чем в более ранних и более поздних пластах. В земных породах иридия содержится гораздо меньше, чем на Солнце и в метеоритах, вероятно потому, что он осел к центру Земли вместе с железом. Его повышенная концентрация в позднемеловом слое является сильным доводом в пользу того, что в то время в Землю врезался астероид диаметром около 10 км. В результате мощного взрыва в атмосферу были бы подняты тучи пыли (свыше тысячи кубических километров). Такого количества пыли достаточно для того, чтобы в течение нескольких лет преграждать путь солнечным лучам. Был нарушен процесс фотосинтеза, что прервало пищевую цепь и от того года вымерли все позвоночные массой более 20 кг, исчезла половина всех видов живых организмов.

Объединенными усилиями человечество могло бы значительно уменьшить опасность, связанную с падением метеоритов. Скоординиро-



Рис. 56. Полярное сияние, лучистая полоса (Фото В. Хесслера в Колледже, Аляска.)

ванные наблюдения космического пространства и запуск ракеты к потенциально угрожающему столкновением телу позволили бы изменить траекторию его полета и избежать столкновения. Стоимость таких работ, вероятно, не превышала бы общие расходы на вооружение, но они с большим успехом могли бы предотвратить космическую катастрофу.

Атмосфера защищает нас не только от мелких метеоров, но и от смертоносной космической радиации. Излучение в ближней ультрафиолетовой области спектра вызывает загар и вообще важно для здоровья. Под действием солнечных лучей в атмосфере образуется озон (молекула которого состоит из трех атомов кислорода): он образует защитный

слой от более коротковолнового излучения в дальней ультрафиолетовой области, представляющего опасность для всего живого. Кислород, азот и другие химические элементы, входящие в состав атмосферы, поглощают все излучение в далекой ультрафиолетовой области ниже предела поглощения озона. Такое излучение используется иногда в медицине для уничтожения бактерий в воздухе. Если бы весь поток ультрафиолетового излучения достигал земной поверхности, то жизнь на Земле в какой-либо форме вообще не могла бы существовать, по крайней мере на суше.

Атмосфера задерживает также многие частицы, опасные для жизни. Эти частицы с положительным и отрицательным зарядами приходят как от Солнца, так и из межзвездного пространства. Потoki заряженных частиц, вызывающих *полярное сияние* (рис. 56), испускаются Солнцем, тогда как *космические тучи* приходят частично от Солнца, а частично из удаленных областей Галактики. Именуются и другие типы излучений и частиц, которым не даст проникнуть к земле наша атмосфера. В современных ускорителях могут генерироваться чрезвычайно опасные для жизни потоки частиц высокой энергии, эквивалентные космическим лучам. Космические тучи, достигающие земли, и распад ядер в космическом пространстве создают высокоэнергичное гамма- и рентгеновское излучения, которые в одинаковой степени опасны для жизни.

Для продолжительного существования жизни на Земле, как известно, необходимо, чтобы выполнялся ряд весьма специфических условий. Таящиеся в космосе опасности определяют следующие условия: расстояние планеты от звезды должно быть заключено в довольно узких пределах; поток излучения звезды должен быть очень стабильным в течение длительных интервалов времени; планета должна обладать атмосферой, способной регулировать температуру и экранировать поверхность от опасных излучений и частиц.

Мы не можем привести точный химический состав атмосферы, необходимый для жизни. До тех пор, пока не будет выполнено гораздо больше экспериментов, трудно судить, в каких пределах может изменяться химический состав атмосферы, не причиняя вреда разнообразным формам жизни, но, по-видимому, эти пределы очень широки. Вероятно, важнейшими составляющими являются кислород, азот и углекислый газ, и конечно, должна также присутствовать вода (табл. 1). Растения земных пустынь способны подолгу обходиться без воды, но вода в той или иной форме необходима для всех известных нам форм жизни. Сначала химический состав атмосферы, вероятно, определялся вулканическими газами и их химическими соединениями с поверхностными породами. Сейчас, например, в горных породах земной поверхности в различных химических соединениях связано больше кислорода и углерода, чем их содержится в атмосфере. Когда жизнь широко распространена, биохимические реакции оказывают влияние на состав атмосферы, наземные и водные растения теперь конкурируют с силикатными породами в поглощении углекислого газа, однако сохра-

Таблица 1

Химический состав
воздуха

Компонент	Содержание по объему, %
Азот	78,08
Кислород	20,95
Аргон	0,93
Углекислый газ (CO ₂)	0,03
Неон	0,0018
Гелий	0,0005
Метан (CH ₄)	0,0002
Криптон	0,0001
Сернистый газ (SO ₂)	0,0001
Водород	0,0005
Водяной пар (H ₂ O)	0,2-0,4
Другие газы и пыль	Следы

няется довольно устойчивое равновесие вследствие гниения растительных остатков и эрозии известняков.

Со времен второй мировой войны для зондирования верхней атмосферы и ближнего космоса широко применяются высотные ракеты (рис. 57). Результаты измерений с помощью установленных на их борту приборов передаются по радио на Землю. Оказалось, что химический состав атмосферы практически не меняется до высот около 90 км. Скорость ветра, определенная по дрейфу метеорных следов (рис. 58) и серебристых облаков, наблюдаемых у полярного круга на высотах около 80 км, может достигать более 160 км/ч. Перемешивания воздуха под действием таких сильных ветров достаточно, чтобы предотвратить заметную диффузию легких газов, таких, как водород, до высот приблизительно 90 км. В настоящее время используется несколько методов измерения плотности и температуры воздуха на больших высотах. Они сложны и основаны на измерениях скоростей звуковых волн, порожденных взрывами, сопротивления воздуха движению метеоров, отражения радиоволн, на прямых измерениях в ракетных экспериментах, а в стоях выше 160 км — на определении скорости спижения орбит искусственных спутников Земли из-за сопротивления воздуха.

На малых высотах примерно до 30 км измерения проводятся с помощью легкой метеорологической аппаратуры, поднимаемой на шарах-зондах. Шары-зонды несут небольшие радиопередатчики, которые передают на Землю данные о температуре, давлении и других метеорологи-



Рис 57 Зондирующая ракета «Азарт», предназначенная для полета в верхнюю измерительную атмосферу, массой около 40 кг на высоте 160 км (Фотография ВМС США.)

ческих параметрах, а их высоты определяются с помощью телескопов или радиолокаторов. Наиболее типичные значения температур на разных высотах приведены на рис 59, где также показаны некоторые характерные явления в земной атмосфере.

Температура воздуха быстро падает с высотой в области толщиной несколько километров, в пределах которой располагается основная



Рис 58

Ослепительный, мслзорный — это сфотографированный с высоты 100 км дымовидный газ, так быстро расширяющийся под действием вакуума в условиях космических высот. (Фото Габриэльской обсерватории)

облачность; здесь существует довольно сильная вертикальная циркуляция и воздух охлаждается, расширяясь при подъеме. С ростом высоты под действием солнечного излучения небольшая доля кислорода превращается из пригодной для дыхания молекулы O_2 в крайне ядовитый озон O_3 . Поглощение озоном ультрафиолетового излучения способствует нагреванию атмосферы и предотвращает дальнейшее падение температуры. Поэтому температурный минимум наблюдается в стратосфере на высоте примерно 17 км, а максимум — около 50 км, где почти достигается приповерхностная температура. Другой очень глубокий минимум отмечается вблизи 80 км, выше которого температура снова начинает возрастать. Выше 300 км наблюдаются лишь следы атмосферы, нагреваемые солнечным ультрафиолетовым излучением и частицами высокой энергии до температуры примерно 1500°С.

Выше приблизительно 1000 км находятся радиационные пояса (рис. 60 и 61), открытые во время измерений на первых советских и американских спутниках. Радиационные пояса можно рассматривать как области земной атмосферы, заполненные очень энергичными ядрами атомов, в основном водорода, и электронами, захваченными магнитным полем Земли. Радиационные пояса очень опасны для живых организмов, не защищенных слоем, эквивалентным приблизительно 1,3 см

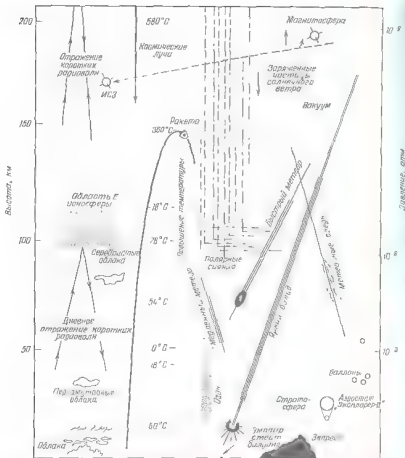


Рис. 59 Явления в верхней атмосфере (Рисунок Д. В. Савельева)

свинца, но даже через такой слой может проникать небольшое число частиц. Некоторая доля частиц радиационных поясов возникает при взаимодействии космических лучей с атмосферой, а основная часть создается мощными потоками частиц, выбрасываемых Солнцем, особенно во время вспышек. Они могут также попадать сюда в результате высотных ядерных взрывов. Из внешних частей поясов частицы уходят довольно быстро, в течение суток или нескольких часов, тогда как в центральной части отдельные частицы могут оставаться гораздо дольше.

Плотность воздуха уменьшается с высотой и составляет одну миллионную приповерхностного значения на высоте около 95 км. Половина

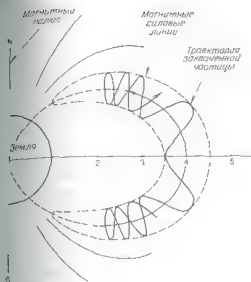


Рис. 60.

Заряженные частицы захватываются магнитным полем Земли, в котором они движутся по винтовым траекториям вдоль магнитных силовых линий. Числа вдоль горизонтальной линии — расстояния в земных радиусах.

всего воздуха содержится в первых 5,6 км над поверхностью, половина оставшегося — до высоты 11,3 км и т. д. На высотах, где наблюдаются метеоры, отражаются радиоволны и появляются полярные сияния, плотность воздуха не больше, чем в вакуумной камере. Если бы даже земная атмосфера была гораздо сильнее разрежена, она все равно была бы хорошей защитой от внешних опасностей, но не могла бы так эффективно регулировать температуру поверхности.

Разумеется, внутреннее строение Земли изучать гораздо сложнее, чем атмосферу, но разработаны достаточно эффективные методы, позволяющие заглянуть в земные недра. Глубокие скважины проникают на глубину всего 10 км — пренебрежимо малую долю земного радиуса. Важную информацию об объемном распределении масс в недрах Земли удалось собрать с помощью искусственных спутников и измерений влияния экваториального вздутия Земли на движение Луны. Геологические данные очень важны для описания поверхностных слоев. Изменения ускорения силы тяжести от точки к точке, напряженности и направления геомагнитного поля дают дополнительные ценные сведения о более глубоких слоях, но наиболее надежную информацию о слоях, лежащих на глубине нескольких километров, приносят данные о характере распространения в Земле волн, порождаемых землетрясениями (сейсмическими волнами). Даже для краткого описания многочисленных ме-

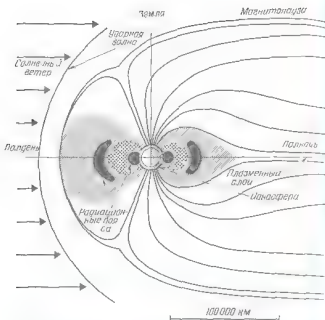


Рис. 61

Магнитосфера Земли состоит из плазмы, сжатой магнитным полем Земли. В плазме существуют электрические токи и электромагнитные волны. В магнитосфере существуют сложные и переменные плазменные структуры.

годов изучения Земли пришлось бы написать по крайней мере еще одну книгу. Поэтому здесь мы лишь кратко опишем некоторые представления о строении Земли и покажем, насколько рискованно жить на тонкой оболочке планеты.

По астрономическим данным определена средняя плотность Земли ($5,52 \text{ г/см}^3$) и форма ее поверхности; притяжение экваториального вдутия и известная плотность горных пород дают согласующиеся между собой значения плотности слоев, прилегающих к поверхности: $2,6 \text{ г/см}^3$, т.е. вдвое меньше средней плотности нашей планеты.

Бурение глубоких скважин показывает, что температура в общем растет с глубиной со средней скоростью 1° на каждые 50 м, хотя ее значение очень сильно меняется от места к месту. Если бы такой рост температуры продолжался до центра Земли, то температура там достигала бы весьма высокого значения $130\,000^\circ\text{C}$. Однако согласно геофизическим исследованиям, она значительно ниже и равна приблизительно 6000°C . Очень быстрое изменение температуры с глубиной близ поверхности связано с низкой теплопроводностью поверхностных пород, напротив, в более глубоких слоях, обладающих более высокой теплопро-

водностью, изменение температуры происходит медленнее. Радиоактивные элементы, такие, как уран и торий, ныне сосредоточенные, по-видимому, в основном в земной коре, дополнительно нагревают внешние слои. Продукты радиоактивного распада, прежде всего гелий и изотопы свинца, позволяют определить возраст горных пород, в которых они находятся, и самой Земли, возраст которой, как оказалось, составляет около 4,6 млрд. лет.

Геофизические данные показывают, что когда-то вследствие разогрева недра Земли были расплавлены. После распада короткоживущих радиоактивных элементов вся планета охладилась и большая ее часть стала твердой. На ранних стадиях, свыше 4 млрд. лет назад, скорость потери тепла, вероятно, была много больше, чем в настоящее время, так как быстрые конвективные токи в недрах должны были быстро вынести тепло наверх. После образования твердой коры скорость тепловых потерь значительно уменьшилась, и теперь извержения вулканов и потоки лавы выносят лишь несколько процентов общего количества тепла.

Если бы не информация, полученная при изучении сейсмических волн, представления о строении глубоких недр Земли носили бы преимущественно умозрительный характер. В результате землетрясения (которое обычно происходит при внезапном смещении пород, слагающих кору, вдоль разлома, иногда на глубине до сотен километров) возникают два основных типа волн, распространяющихся сквозь Землю во всех направлениях. *P*-волна продольная волна, или волна сжатия, подобна звуковой волне. Колебания частиц среды происходят вдоль направления распространения волны (рис. 62). Другой тип колебаний *S*-волна поперечная волна, или волна сдвига; в этих колебаниях движения частиц среды перпендикулярны направлению распространения волны, как в случаях электромагнитных волн и волн на поверхности воды (рис. 62). *P*-волна всегда распространяется быстрее (примерно в 1,8 раза), чем *S*-волна, поэтому сейсмограмма землетрясения, записанная сейсмографом сейсмической станции, начинается с регистрации *P*-волны (рис. 63). На глубине нескольких километров *P*-волна распространяется со скоростью около 8 км/с, а *S*-волна со скоростью 4,6 км/с. Скорость обеих волн возрастает на больших глубинах, где плотность и давление выше. Разрушительная энергия землетрясений переносится более медленными поверхностными волнами (*L*-волны), более сложными по характеру, чем *P*- и *S*-волны.

Самый интересный результат, полученный при изучении записей сейсмических волн после прохождения ими различных частей Земли, состоит в том, что *S*-волны не проникают в ядро, которое простирается несколько дальше, чем на половину земного радиуса от центра (рис. 64). Поскольку *S*-волны затухают в жидкости, ядро должно быть жидким, причем его плотность приблизительно в два раза выше средней плотности Земли. Это внешнее жидкое ядро содержит внутреннее твердое ядро еще более высокой плотности радиусом 1300 км.

Давление вблизи центра Земли достигает колоссального значения

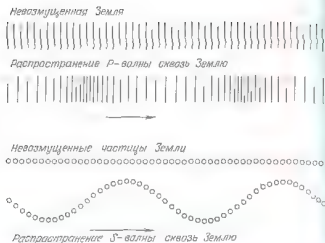


Рис 62

Сейсмическая волна, распространяющаяся в твердой среде, может быть продольной (Р-волна) или поперечной (S-волна). Продольная волна распространяется быстрее поперечной. Скорость распространения волн зависит от упругих свойств среды.

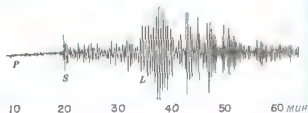


Рис 63

Сейсмическая волна, распространяющаяся в твердой среде, может быть продольной (Р-волна) или поперечной (S-волна). Продольная волна распространяется быстрее поперечной. Скорость распространения волн зависит от упругих свойств среды.

3,7 млн атм. Поэтому трудно предсказать, при какой температуре любое данное вещество будет плавиться и до какой степени оно будет сжато. Разумеется, сжатие твердых и жидких веществ вблизи центра будет значительным, а температура плавления соответственно выше. Поскольку Земля намагничена и поскольку железо и никель-железо преобладают в метеоритах (единственных доступных нам образцах внеземного вещества), большинство исследователей считают, что земное ядро в основном является железным или железо-никелевым с примесью таких легких элементов, как сера, кремний и кислород. Под действием высокого давления плотность железа, равная $7,7 \text{ г/см}^3$ на поверхности

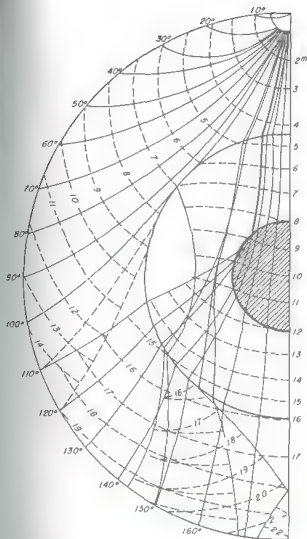


Рис 64

Траектории распространения сейсмических волн по разрезу Земли рисовались Нильсеном в 1906 году. Земля с глубиной теряет жесткость, траектории изобразил на рисунке Р. Вольф, реконструировался и график ядра. Сейсмические волны не проникают в ядро и не достигают станиц, находящихся на противоположной стороне от точки, в которой произошло землетрясение. Числа означают минуты после начала распространения по той или иной траектории от центра до внутреннего ядра.

Земли, возрастает до $10-12 \text{ г см}^3$ в ее центре. Там *P*-волны распространяются со скоростью около 11 км/с .

В переходной зоне между внутренним и внешним ядром (рис. 64) плотность близка к средней плотности Земли как целого. Обычные скальные породы сжимаются под действием давления до такой плотности. Верхняя мантия несколько плотнее ($4,3 \text{ г см}^3$), чем тяжелые горные породы, но может быть сложена в основном из них. Кора сложена главным образом из гранитов и других вулканических и осадочных пород, как почвенных в самом верхнем слое толщиной в среднем около нескольких километров.

Толщина земной коры меняется от места к месту, но, по-видимому, толщина материковой коры составляет около 40 км , а океанической коры на некоторых участках всего лишь 6 км . Кора, вероятно, подвергается деформациям, но исключительно вязком слое *астеносфере* толщиной $100-600 \text{ км}$. Это часть земной *мантии*, которая простирается от нижней границы коры до верхней границы внешнего ядра. Образование гор и протяженных деформаций коры ясно показывает, что кора подвержена движениям, которые были бы невозможны, если бы не было подстилающего слоя псевдожидкого вещества, вызывающего эти явления. Согласно принципу *изостазии*, полная масса под любой данной областью постоянна. Легкие поверхностные вещества, подобные тем, которые образуют горы, всплывают. Под ледниками поверхность опускается, а затем, после того как лед растает, медленно поднимается. Для кратковременно действующих сил, например сейсмических волн, эти породы очень прочные, но силам, действующим в течение продолжительных интервалов времени, они поддаются. К таким веществам относится стекло «Силли-Патти» — кремниевое соединение, которое обладает упругостью при ударе, но становится пластичным как воск и текучим как вода, если сила действует в течение нескольких часов. Оно хорошо имитирует свойства твердой породы в короткой шкале времени. Извержения вулканов свидетельствуют о том, что должно существовать жидкое подкоровое вещество, но вовсе не обязательно, чтобы все вещество деформируемого слоя было жидким в обычном смысле.

В последние годы было проведено обширное картографирование, взятие образцов, бурение и измерения температуры дна океанов, в частности Вудсхолловским океанографическим институтом (шт. Массачусетс) и Скриппсовским институтом в Ла Холлье (шт. Калифорния). Вдоль всего Атлантического океана проходит высокий горный хребет — Срединно-Атлантический хребет с глубокой рифтовой впадиной близ его гребня (рис. 65). Такие системы хребтов, некоторые высотой до 2000 м , обычно с рифтовыми впадинами, существуют в большинстве океанов. Вообще температурный градиент под океанским дном больше вблизи рифтов, а это значит, что здесь выше тепловые потери, а кора тоньше. Поперечные разломы в десятки и сотни километров длиной часто нарушают непрерывность рифтов. Недавно с подводных лодок удалось изучить глубинные районы дна океана вдоль рифтов и в неко-



Рис 65

Срединно-Атлантический хребет. Дно рифтовой впадины находится на глубине от 3000 до 5000 м о. уровня моря, впадина окаймлена рифтовыми гребнями, вершины которых лежат на глубине всего 1-200-2500 м. Вдоль рифта систематически происходят сильные землетрясения. Штриховые линии контуры Срединно-Атлантического хребта. (По Б. Хизеку.)

торых случаях была открыта поразительно разнообразная морская жизнь и даже новые виды. Тепло лавы из-под дна океанов нагревает места воду, вдоль рифтов прослеживаются потоки застывшей лавы.

Геологические данные двух типов: климатические изменения за последние 500 млн лет и следы древних магнитных полей, сохранившихся в древних осадочных породах и лавах, указывают на то, что тонкая земная кора скользила по лежащим под ней слоям подобно скорлупе яйца. Это движение напоминает классический способ, позволяющий отличить сырое яйцо от сваренного вкрутую, не разбивая скорлупы. Если

вращающееся сырое яйцо остановить и внезапно отпустить, то оно снова начнет вращаться. Северный полюс, возможно, располагался когда-то в Тихом океане. Земные полюса испытывают колебательное движение, возможно, периодическое, амплитудой несколько метров. Это следует из наблюдений изменений широты в различных точках земного шара (рис. 66).

Дрейф континентов относительно друг друга больше не вызывает сомнений. Рис. 67 иллюстрирует, как из единого континента образовались современные континенты в соответствии с теорией, выдвинутой Альфредом Вегенером в 1924 г. Подгонка частей «картинки-головоломки» подтверждается новыми свидетельствами в дополнение к биологическим. Океанографические исследования, описанные выше, показывают, что слой осадков тоньше и возраст их меньше вблизи срединно-океанических хребтов, с которыми преимущественно связана тектоническая активность. Если сдвинуть материки и совместить образования, сложенные из одинаковых, древних пород, то, как видно на рис. 67, Африка образует единое целое с Южной Америкой, а Гренландия с Британскими островами. Океаническое дно близ хребтов очень медленно расширяется со скоростью несколько сантиметров в год. Доказательство этого расширения, найденное Ф. Вайном и Т. Уилсоном в 1966 г., окончательно убедило геофизиков в реальности дрейфа континентов. Вайн и Уилсон нашли, что магнитная полярность в узких полосах, перпендикулярных срединно-океаническому хребту близ остров. Ванкувер, по обе стороны от хребта одинакова. По мере того как новые потоки магмы извергались вдоль хребта, они намагничивались в геомагнитном поле и застывали, увековечивая направление магнитного поля той эпохи. При измерениях на других срединно-океанических хребтах также обнаружено это явление, которое можно датировать с помощью других магнитных наблюдений. Континенты отделились от общего сверхконтинента Пангеи около 200 млн лет назад. Он довольно быстро распался, всего примерно за 20 млн лет, при этом образовались Лавразия, к которой принадлежат также Северная Америка и Гондвана. К этому времени от Гондваны отделились Антарктида, Австралия и Индия. Южная Америка отделилась от Южной Африки несколько позже, так что Атлантическому океану всего лишь 160 млн лет.

Современные представления о распаде Пангеи, основанные на значительно уточненных данных о возрасте горных пород, отличаются от первоначальных идей Вегенера (рис. 67) главным образом тем, что первый большой рифт, вероятнее всего, возник вдоль кривой, лежащей между Северной и Южной Америкой и между Азией и Африкой, а не между Америкой и Евразией и Африкой. Индия, очевидно, отделилась от Австралии, столкнулась с Азией и таким путем образовались Гималаи.

Основная причина существования океанических рифтов, дрейфа континентов, возникновения гор, вулканов и других крупных проявлений тектонической активности земной коры теперь хорошо понята, хотя еще не все детали ясны. Она связана с *тектоникой плит Литосфера Земли*

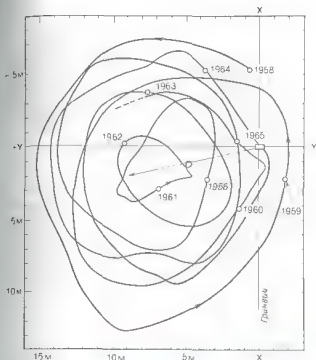


Рис. 66

Движение Северного полюса по поверхности Земли с 1958 по 1966 г. Прямоугольник — средняя начальная точка в 1903 г., стрелка показывает direction движения полюса (С любезного разрешения Смитсоновской астрофизической обсерватории)

разбита на крупные плиты континентальных размеров, которые перемещаются по астеносфере в горизонтальном направлении под действием тепловой циркуляции под корой. За счет поднимающегося из недр вещества близ срединно-океанических хребтов литосферные плиты постепенно наращиваются и расходятся в стороны. Когда одна плита наплетается на край другой, более плотная океаническая кора погружается под более легкую континентальную кору и сминает край континента. В результате могут образовываться островные дуги, подобные Японским или Алеутским островам. Там, где две литосферные плиты сталкиваются друг с другом, возникают большие горы, например Гималаи. До тех пор пока постепенно угасающая радиоактивность будет поддерживать земные недра достаточно горячими, континенты будут дрейфовать и изменяться, вулканы рождаться и угасать, а горы возникать и разрушаться. По астрономическим масштабам времени на земной поверхности

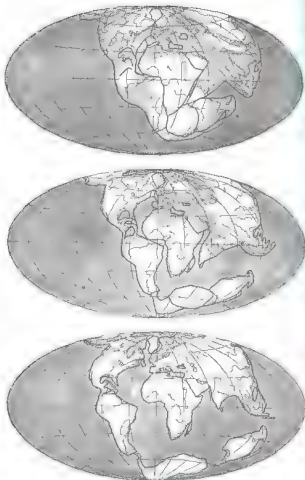


Рис. 67. Дрейф континентов со. theo теории Вегенера (Leobach и Pflugk, с любезного разрешения Фридриха Вегенера и сына

сти царит суматоха. Понемногу мы начинаем регистрировать медленные движения континентов. При помощи лазерных сигналов, отраженных от искусственных спутников, космических зондов и Луны межконтинентальные расстояния будут измерены с точностью до нескольких сантиметров раньше, чем можно было ожидать. В результате наблюдений искусственных спутников ошибки в измерении расстояний уже уменьшены от ста метров до менее одного метра.

Колебания земного полюса — точки, в которой ось вращения пересе-

клет поверхность Земли, - невелики, но представляют интерес, поскольку хорошо объясняются теоретически. Период основного колебания около 430 суток, а более слабого - около года (рис. 66). Сезонные изменения, связанные с таянием и увеличением полярных льдов вызывают годичный эффект, а вот 430-суточный период еще требует объяснения. Если снова сравнить Землю с волчком, то она похожа на плохо закрученный волчок, не точно вокруг оси симметрии, перпендикулярной плоскости экваториального вздутия. Сильные землетрясения также могут слегка сместить полюс и изменить характер его колебаний. Если бы Земля была абсолютно твердой, то полюс колебался бы с периодом около 10 месяцев, но поскольку твердость Земли только в два раза превышает твердость стали, период ее собственных колебаний должен составлять 430 сут, что и наблюдается.

Хрупкая земная кора, перемещающаяся по астеносфере, вовсе не является такой устойчивой и неизменной, как кажется. Ведь она не только дрейфует, но в течение геологической истории в ней образуются трещины и складки. Многие области, полностью покрытые льдом в ледниковые эпохи, опускались под его тяжестью. Когда ледники отступали, эти области поднимались снова. Матининное поле продолжает буждаться, изредка изменяя знак, а континенты перемещаются и меняют свои очертания. Коры постоянно сотрясают землетрясения. В любое время могут активизироваться вулканы, иногда их извержения имеют катастрофические последствия, как, например, чудовищный взрыв Кракатау в Индонезии. Кроме того, падение гигантских метеоритов может опустошить громадную территорию.

Если подумать о всех опасностях, подстерегающих жизнь, которые таятся как на самой Земле, так и за ее пределами, то остается только удивляться, что мы еще существуем, но, разумеется, если до сих пор это не вызывало у вас удивления.

Влияние Луны на Землю

Давно минули те времена, когда люди считали, что таинственные силы Луны оказывают влияние на их повседневную жизнь. Никто больше не пытается приписать Луне свои успехи или обвинить ее в своих неудачах. Но Луна действительно оказывает разнообразное влияние на Землю, которое обусловлено простыми законами физики и прежде всего динамики.

Луна так велика и так близка к нам, что в полнолуние она создает освещенность, достаточную для многих практических целей. Она достаточно массивна, чтобы изменять форму Земли и вызывать приливы в открытых морях и океанах. Сила притяжения Луны основная сила, вызывающая прецессию земных полюсов. Изменения формы Земли под действием этой силы являются причиной торможения, вследствие которого продолжительность земных суток медленно увеличивается. Время от времени тень Луны достигает земной поверхности, и тогда в узкой полосе, по которой скользит тень, наблюдается полное солнечное затмение. Так наша ближайшая космическая соседка дает знать о своем присутствии. Чтобы понять, в чем причина перечисленных явлений, начнем с изучения движения и внешнего вида Луны.

Календарный месяц приблизительно равен периоду обращения Луны вокруг Земли. Если бы в календаре можно было использовать доли месяца, то год насчитывал бы 12,37 . месяца, так как средняя продолжительность месяца равна 29 сут 12 ч 44 мин 2,8 с. Это так называемый *синодический месяц* — промежуток времени, в течение которого Луна проходит последовательность фаз от *новолуния* через *первую четверть* *полнолуние*, *третью четверть* до следующего новолуния (рис. 68) и совершает полный оборот вокруг Земли по отношению к Солнцу. Поскольку за это время Земля перемещается по своей орбите приблизительно на 30 . истинный, или *сидерический*, месяц, измеряемый относительно звезд, на двое с небольшим суток короче синодического. В среднем продолжительность сидерического месяца составляет 27 сут 7 ч 43 мин 11,5 с.

Причину различия продолжительности синодического и сидерическо-

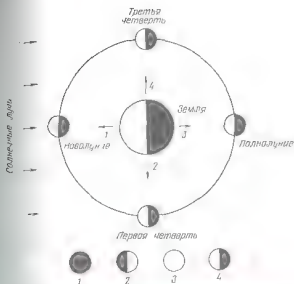


Рис. 68

Фазы Луны для наблюдателя на Земле в течение одного синодического месяца.

го месяцев иллюстрирует рис. 69. Пусть положение *A* соответствует новолунию (Солнце, Луна и Земля располагаются на одной прямой). Луна возвращается к такому же, как в положении *A*, направлению относительно звезд раньше, чем снова наступит новолуние (положение *B*), поскольку Земля переместится по своей орбите вокруг Солнца.

Самая удивительная особенность движения Луны состоит в том, что скорость ее вращения вокруг оси совпадает со средней угловой скоростью обращения вокруг Земли. Поэтому Луна всегда обращена к Земле одним и тем же полушарием. Чтобы продемонстрировать это движение, возьмите шар или глобус, держите его неподвижно в вытянутой руке и медленно поворачивайтесь. Когда вы совершите полный оборот, шар также сделает полный оборот, но вы будете видеть только одну его сторону.

Поскольку Луна — ближайшее небесное тело, ее расстояние от Земли известно с наибольшей точностью, до нескольких сантиметров по измерениям с помощью лазеров и лазерных дальномеров. Наименьшее расстояние между центрами Земли и Луны равно 356 410 км. Наблюдатель, находящийся на Земле, может приблизиться к Луне еще на половину земного диаметра (рис. 70). Наибольшее расстояние Луны от Земли достигает 406 700 км, а среднее расстояние составляет 384 401 км.

Земная атмосфера искривляет лучи света до такой степени, что всю Луну (или Солнце) можно видеть еще до восхода или после заката. Дело

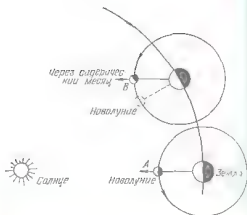


Рис. 69

Сатурнический месяц в тропе синдикского. Луна еще не достигла в воздухе в положении В, хотя она уже завершила оборот вокруг Земли по отношению к звездам.

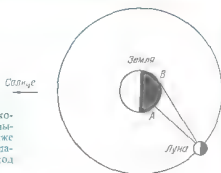


Рис. 70.

Наблюдатель А, который видит Луну высоко в небе, ближе к ней, чем наблюдатель В, видящий заход Луны.

в том, что преломление лучей света, входящих в атмосферу из безвоздушного пространства, составляет как раз около 0,5, т. е. равно видимому угловому диаметру Луны. Таким образом, когда верхний край истинной Луны находится чуть ниже горизонта, вся Луна видна над горизонтом (рис. 71). Чем больше высота над горизонтом, тем меньше атмосферная рефракция, а в зените она обращается в нуль.

Наверное, каждый замечал странное явление. Луна кажется больше, когда она находится вблизи горизонта, чем когда она высоко в небе. Однако, согласно измерениям, видимый диаметр меньше у горизонта, поскольку при этом ее расстояние от наблюдателя больше (см. выше) и также вследствие легкого сжатия диска в результате рефракции. Обычно это объясняется так: Луна кажется больше, когда она видна в непосредственном соседстве с далекими объектами у горизонта, чем

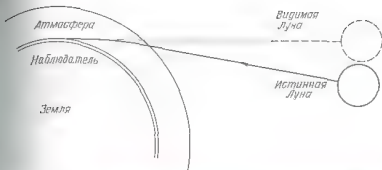


Рис 71 Вследствие атмосферной рефракции Луна или Солнце видны над горизонтом после геометрического захода.

когда она высоко в небе. Это объяснение нельзя признать удовлетворительным: ведь такой же эффект наблюдается и в открытом море, и на равнинах. Психологи считают, что этот эффект обусловлен особыми свойствами человеческого мозга и зрения. Наблюдатель склонен представлять себе Луну более далекой, когда она вблизи горизонта, чем тогда, когда она поднялась высоко в небо, т.е. он бессознательно как бы помещает Луну на горизонт. Поскольку угловые размеры остаются неизменными, она выглядит заметно большей у горизонта, где она кажется более удаленной (рис. 72).

Как бы ни важна была Луна в качестве объекта, возбуждающего человеческое воображение, наибольшее влияние на Землю оказывает ее приливообразующая сила. Эта сила — прямое следствие гравитационного притяжения Земли близкой Луной. Еще Ньютон понял, что приливы служат подтверждением его закона всемирного тяготения. Поскольку сила притяжения обратно пропорциональна квадрату расстояния, обращенная к Луне сторона Земли, притягивается с силой, на 7% большей, чем дальняя сторона. В центре Земли, сила притяжения в точности равна силе, необходимой для удержания Луны на ее орбите. Эта разность сил ведет к искажению формы Земли — растягивает шар вдоль линии, соединяющей Луну и Землю (рис. 73).

Самая интересная особенность приливов состоит в том, что образуются сразу два приливных горба: один на обращенной к Луне стороне Земли, другой на противоположной стороне. Это явление можно объяснить, приняв во внимание, что ближе к Луне полушарие Земли притягивается сильнее, чем центр, а центр сильнее, чем противоположное Луне полушарие. Это приводит также к сжатию Земли в направлении, перпендикулярном линии Земля — Луна. Под влиянием приливообразующих сил Земля принимает форму эллипсоида (фигуры, подобной яйцу, но только симметричному).

Далее, если бы Земля была абсолютно твердой и не поддавалась действию возмущающих сил, приливные эффекты наблюдались бы

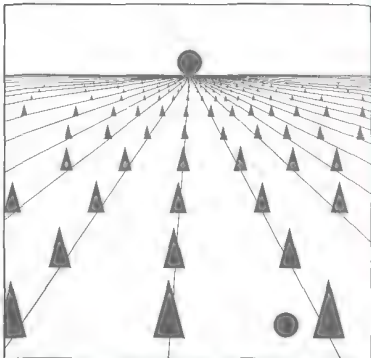


Рис 72 «Лунная» оптическая и физическая размеры (По рисунку Рока и Кауфмана)

в океанах и поверхностных водах. Если бы Земля была идеально упругой и совершенно лишена жесткости, океанские приливы были бы пренебрежимо малы, хотя приливной горб все же существовал бы. Предсказание высоты океанских приливов исключительно трудная задача, поскольку высота наблюдаемых на прибрежных станциях приливов определяется течениями, возникающими над особенностями рельефа океанского дна. Тщательные измерения приливов в длинных трубах показывают, что наблюдаемая высота составляет всего 70%, предсказываемой теоретически. Остальные 30%, проявляются в твердом теле Земли. Из измерений следует, что твердость Земли в целом выше, чем твердость стали. Мы видели в гл. 6, что данные наблюдений землетрясений и движения полюсов Земли подтверждают такой вывод. За пределами жидкого ядра твердость Земли вдвое превышает твердость стали.

Из первых экспериментов был получен другой удивительный результат. Оказывается, *Земля — упругий шар*. До проведения этих экспериментов обычно считали, что Земля вязкая, подобно патоке или расплавленному стеклу, при небольших искажениях она должна была бы

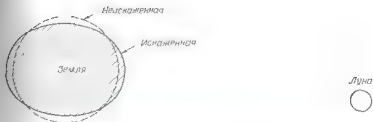


Рис. 73. Объяснение приливов. Притяжение Луны растягивает Землю вдоль линии, соединяющей их центры.

вероятно, сохранять их или же медленно возвращаться к своей исходной форме под действием слабых восстанавливающих сил. Эксперименты показали, что Земля в целом немедленно поддается приливообразующим силам и сразу же возвращается к первоначальной форме после прекращения их действия. Таким образом, Земля не только тверже стали, но и более упругая.

Хотя приливы в основном обусловлены притяжением Луны, Солнце также вносит заметный вклад в это явление, но его притяжение примерно в два раза меньше. Солнце действует точно так же, как и Луна. Когда Солнце и Луна находятся примерно на одной прямой, т. е. в новолуние или полнолуние, их силы тяготения складываются. Когда же Солнце и Луна находятся под прямым углом друг к другу, их общее приливное действие меньше. В результате в новолуния и полнолуния наблюдаются сизигийные, наиболее сильные приливы и отливы. В промежутки между ними, в первую и третью четверти, происходят квадратурные приливы и отливы, амплитуда которых примерно вдвое слабее, чем сизигийных.

На высоту приливов влияет еще один фактор. Когда Луна находится ближе всего к Земле (в перигее), ее притяжение больше, чем в наиболее удаленной от Земли точке орбиты (в апогее). Вследствие такого изменения расстояний приливообразующая сила изменяется приблизительно на 30%.

Хотя георетическое предсказание приливов дело сложное, еще труднее предсказать высоту прилива на данной станции. Обычно амплитуды приливов на береговых станциях достигают нескольких метров, что значительно больше средних ожидаемых значений, следующих из простой теории. Такое расхождение связано с тем, что измерения проводятся в мелких прибрежных районах океанов. Вследствие вращения Земли приливные горбы (рис. 73) фактически превращаются в приливные волны, которые растут на наклонном дне океанов близ берегов, почти так же, как растет высота морских волн с приближением к отлого поднимающейся отмели. В заливе Фанди на атлантическом побережье Канады, где этот эффект усиливается из-за воронкообразных очертаний береговой линии, высота приливов часто достигает 16 м и более. Во многих местах наибольшая высота приливов постоянно достигается че-

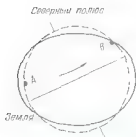


Рис. 74 Разная высота двух приливов, происходящих в одном месте в течение суток. Прилив в точке А выше, чем прилив в точке В

рез несколько часов после максимума приливообразующих сил. Это наблюдается запаздывание называется приливным часом и используется для предсказания приливов.

На высокоширотных станциях хорошо заметен эффект, связанный с наклоном эквипланки к небесному экватору. Поскольку земная ось наклонена к плоскости лунной орбиты, высота двух приливов, наблюдаемых в течение одних суток, может сильно различаться. На рис. 74 видно, что амплитуда прилива в точке А будет больше, чем через полсуток в точке В. Из некоторых станций часто заметен только один прилив вместо двух.

Вряд ли когонибудь из очевидцев оставит равнодушным другое замечательное явление, связанное с Луной, полное солнечное затмение. Время от времени Солнце, Луна и Земля располагаются так относительно друг друга, что Луна преграждает путь солнечным лучам на небольших участках земной поверхности. Будь Луна немного ближе к Земле, солнечное затмение было бы весьма обычным событием, а будь она немного дальше от Земли, полное солнечное затмение было бы вообще невозможно.

На рис. 75 показана траектория лунной тени на поверхности Земли. Наблюдатель, оказавшись в полосе полного затмения, не видит прямых лучей Солнца, зато он видит корону — самую внешнюю разреженную область солнечной атмосферы, могут наблюдаться также высокие протуберанцы. Для наблюдателя вне конуса тени, в области частичного затмения (полутень), закрыта лишь часть солнечного диска. По мере того как лунная тень скользит по земной поверхности, солнечный свет медленно меркнет в течение часа или дольше (рис. 76). Постепенно остается открытым только узкий серп солнечного диска, в природе наступает необычная прохладда и тишина. Однако серп все еще так ярок, что смотреть на него можно только через темный фильтр. Непосредственно перед наступлением полной фазы и сразу после ее конца узкий серп разбивается как бы на ряд бусинок — последние лучи Солнца сияют сквозь углубления неровного края Луны. Это явление Бейли, они сверкают лишь несколько секунд (рис. 77). В это время можно видеть свя-
 тая-



Рис 75

Полное солнечное затмение. Заштрихованная область конус лунной тени, затмеваемая область — полутень, зона частного затмения. Жирная линия — полоса полного затмения. Относительные размеры сильно преувеличены.

щийся ореол, полностью окружающий Луну, и если (что бывает крайне редко) ярка одна-единственная четка, то кажется, что это светлое алмазное кольцо. Правильнее было бы называть это явление четками Уильямса, так как Сэмюэль Уильямс (1748—1817) наблюдал и описал его гораздо раньше Френсиса Бейли (1774—1844).

Продолжительность полного солнечного затмения никогда не превышает 8 мин, обычно оно длится значительно меньше, тем не менее это зрелище с лихвой вознаграждает наблюдателя за трудности путешествия в зону полного затмения. В среднем в каждом данном месте полное солнечное затмение можно наблюдать раз в 360 лет. Иногда только полутень Луны скользит по Земле и вызывает частное затмение; в некоторых случаях Луна находится от Земли на большем расстоянии, и лунный диск не закрывает Солнце полностью. Такое затмение называется *кольцеобразным*.

Лунные затмения, хотя и происходят реже солнечных затмений, но каждое из них доступно наблюдениям более чем с половины земного шара. Следовательно, в любом данном месте лунные затмения можно наблюдать довольно часто. В некоторые годы не бывает ни одного лунного затмения, а наибольшее их число достигает трех. Максимальное общее число солнечных и лунных затмений в календарном году равно семи: пять солнечных и два лунных или четыре солнечных и три лунных. Лунные затмения не так впечатляющи, как солнечные, и не представляют особой ценности для астрономов. Когда Луна полностью попадает в тень Земли, она обычно приобретает медно-красный оттенок, поскольку часть солнечных лучей преломляется в земной атмосфере, голубой свет рассеивается сильнее, и создается эффект, подобный наблюдаемому при заходе Солнца. В редких случаях, когда сумеречная зона в атмосфере Земли полностью закрыта облачностью, Луна бывает очень темной, в других случаях часть Луны освещена в продолжение полной фазы.

Во время солнечного затмения астрономы имеют возможность наблюдать корону — протяженную, но крайне разреженную и горячую оболочку, окружающую Солнце (рис 78). Можно также видеть солнечные протуберанцы — гигантские образования в короне в виде облаков, арок



Рис. 76 Солнечное затмение в феврале 1961 г. (Фото А. Ката, Женева Швейцария; с любезного разрешения журнала *Sky and Telescope*.)

или струй, состоящие из водорода и кальция (рис. 79). Теперь астрономы научились наблюдать протуберанцы и корону и вне затмений. Во время затмения можно сфотографировать звезды вблизи Солнца и измерить их положение. В обычных условиях такие измерения невозможны из-за высокой яркости солнечного света, рассеянного в земной атмосфере. Измерения показали, что луч света далекой звезды несколько отклоняется под действием притяжения Солнца в соответствии с предсказанием общей теории относительности Эйнштейна. Этот факт и аномальное движение перигелия Меркурия представляют два из трех астрономических подтверждений общей теории относительности.

Дошедшие до нас описания солнечных затмений, наблюдавшихся в древности, свидетельствуют о том, что Луна стремится увеличивать



Рис. 77. Четки Бейли. (Фото Йеркской обсерватории)

продолжительность земных суток, замедляя вращение Земли. Отсутствие в античные времена точных приборов для измерения времени не помеха для исследований такого типа, поскольку, зная место, где наблюдалось полное солнечное затмение, можно определить время затмения и положение Луны в момент затмения. Чтобы лунная тень упала в данную точку земной поверхности, Земля должна быть ориентирована определенным образом относительно линии Солнце-Луна-Земля, а Луна должна находиться в определенной точке своей орбиты. Вычисления, основанные на описаниях древних затмений, показывают, что продолжительность суток увеличивается приблизительно на 0,001 с в столетие. Замедление вращения Земли обусловлено приливным трением.

Энергия приливов превращается в тепловую, причем выделяемая мощность составляет около $3 \cdot 10^{19}$ эрг. В 1920 г. сэр Харолд Джефрис рассчитал, что приливное трение перемещающейся воды на мелководье Берингова и Ирландского морей объясняет 80% наблюдаемого изменения продолжительности суток. Согласно современным теориям, приливное трение распределено по океанам гораздо более равномерно.

В нескольких замечательных исследованиях Дж. Уэллс показал, что влияние приливного трения не ограничивается историческим периодом и что оно действовало с древнейших геологических эпох, таких, как Девонский период, около 400 млн. лет назад. У некоторых ископаемых кораллов он нашел кольцообразную структуру, подобную годичным кольцам деревьев, по которой можно проследить суточную и годичную скорость роста. Он установил, что тогда год длился 400 сут, следовательно, продолжительность суток была около 22 ч. Позднее Скраттон нашел месячные кольца, показывающие, что лунный месяц тогда был



Рис. 78 Солнечная корона во время полного солнечного затмения 2 августа 1932 г. (Фото Ликской обсерватории)

равень 21 сут. К этим исключительно важным фактам мы вернемся при обсуждении эволюции Земли и Луны.

С помощью точных наблюдений Луны, Меркурия, Венеры и Солнца в прошлом столетии удалось выявить неправильные вариации продолжительности суток. Отклонения наблюдаемых положений этих тел от вычисленных, пересчитанные с учетом эквивалентной ошибки момента наблюдений положения Луны, показаны на рис. 80. Из почти полной тождественности кривых можно сделать вывод, что Земля плохие часы. В последние десятилетия XIX в. изменения были относительно быстрыми, более 1 с в год. После 1900 г. этот ход замедлился и стал значительно меньше 1 с в год.

«Точность хода» 1 с в год неаппаратно превышает средний суточный ход микатинковых часов, значительно ниже точности современных атомных (квантовых) часов. Для Земли, рассматриваемой как твердое

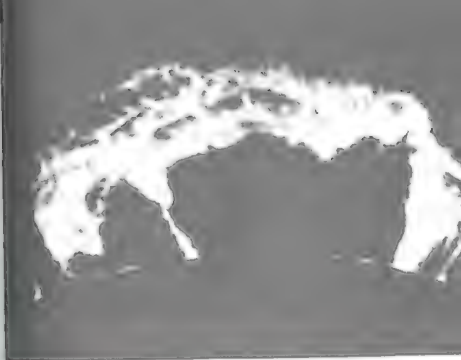


Рис. 79

Солнечные протуберанцы — гигантские облака раскаленного водорода, кальция и других газов. Форма их разнообразна и определяется магнитными полями Солнца. (Фотографии обсерватории Сакраменто-Пик и Кембриджской исследовательской лаборатории ВВС США.)



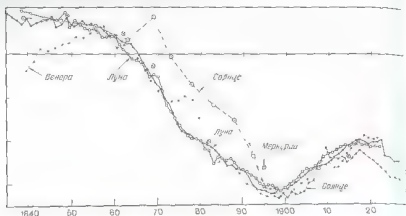


Рис 80

Земля — вовсе не идеальные часы. Кривые, построенные Л. Стержем Дюнсом, представляют наблюдаемые отклонения Луны, Солнца, Венеры и Меркурия от вычисленных положений. Поскольку примерно одинаковые отклонения этих тел вряд ли могут быть случайными, ошибка должна содержаться в моменте наблюдения. Следовательно, Земля вращается неравномерно.

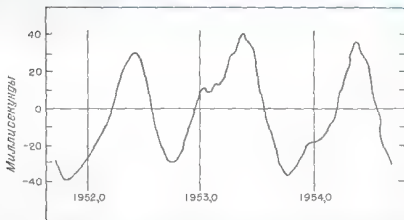


Рис 81.

Сезонные изменения периода суточного вращения Земли (По У. Марковицу, Морская обсерватория США)

гело, это огромное изменение скорости вращения. С другой стороны, если бы радиус Земли равномерно увеличивался или уменьшался лишь на несколько сантиметров, то можно было бы объяснить наблюдавшиеся отклонения. Имеются некоторые данные о связи изменений скорости

вращения Земли с сильными землетрясениями. Это не удивительно, если учесть, что в недрах Земли должны происходить перестройки некоторых типов, в результате которых меняется скорость вращения.

В последние годы для измерения времени стали применяться атомные часы, состоящие из кварцевого генератора, управляемого квантовыми стандартами частоты, такими, как молекулы аммиака, атомы цезия и др. С такими часами достигнута необычайно высокая точность, которая продолжает повышаться благодаря техническому прогрессу. Ошибка 0,001 с в год считается уже большой, и в настоящее время атомные часы совершенствуются, чтобы повысить их точность еще в 10 000 раз. По сравнению с такими часами Земля всего лишь дешевые ходики. Сезонные ветры и метеорологические явления, вариации приливного трения в земной коре и другие более слабые факторы изменяют скорость вращения Земли, вызывая погрешности в измерениях времени астрономическими методами (рис. 81).

Хотя Луна и не оказывает прямого воздействия на человеческую жизнь, она обогащает ее благодаря таким явлениям, как океанские приливы и затмения. А иногда, созерцая Луну, мы испытываем истинное вдохновение.

Наблюдения Луны

Приступив к обзору лунной поверхности, мы столкнемся с проблемой, с которой встретимся еще не раз при изучении планет с Земли, проблемой наблюдений мелких деталей в телескоп. Телескоп — это инструмент высокой точности, своего рода ключ, которым астрономы открывают запертые двери во Вселенную. Однако даже самый совершенный телескоп, установленный на Земле, в руках самого опытного наблюдателя встречается с непреодолимым препятствием — земной атмосферой. Это одна из причин, по которой программа космических исследований так популярна среди астрономов.

Наши знания свойств поверхности Луны (рис. 82) и планет до недавнего времени опирались только на изучение отраженного ими солнечного света, который до появления орбитальных обсерваторий попадал к нам лишь после прохождения сквозь воздушный океан, на дне которого мы живем. Мы уже видели, что атмосферная рефракция отклоняет лучи света на небольшой угол от их первоначальной траектории, к сожалению, в атмосфере не найти двух областей с абсолютно одинаковой по величине рефракцией. Над нами циркулируют ветры, перемещаются потоки теплого и холодного воздуха, поэтому каждый луч света преломляется несколько иначе. Результат этого в буквальном смысле виден невооруженным глазом — звезды мерцают. Но планеты мерцают редко, так как их диски имеют конечные размеры, поэтому планеты телько узнать благодаря постоянству их блеска. Телескоп усиливает мерцания настолько, что часто звездные изображения кажутся «кипящими», словно они видны над поверхностью горячей плиты или над раскаленным песками пустыни. Вследствие турбулентности атмосферы «условия видимости», или качество изображения, могут быть относительно хорошими или плохими, причем качество изображения определяется видом звезд в телескоп.

Мало того, что атмосфера искажает изображения звезд, она еще и похищает около 30% проходящего сквозь нее света, рассеивая его во всех направлениях. За пределами атмосферы ночное небо гораздо чернее, и дневное небо также черное, поэтому в космосе звезды и планеты можно наблюдать днем и ночью. В ясный день, в период когда блеск



Рис 82. Луна после первой четверти север вверх (Фото Ликской обсерватория.)

Венеры близок к максимальному, ее можно видеть невооруженным глазом, если стоять в тени и точно знать, куда смотреть. Были сообщения, что ярчайшие звезды видели через высокие трубы, из шахтных стволов

и т.д. Читателю, который хочет увидеть звезды днем, советуем воспользоваться небольшим телескопом или биноклем.

Только немногим людям довелось увидеть черное небо днем. Первым был майор Альберт У Стивенс, так описавший свои наблюдения в 1935 г. с борта стратостата «Эксплорер II» на высоте 22 км над уровнем моря: «Горизонт выглядел, как полоса белой дымки. Выше небо было голубым, на высоте 20 или 30 над горизонтом оно приобретало привычный синий цвет. На максимальной доступной нам высоте над горизонтом небо было очень черным. Не стану утверждать, что совершенно черным, скорее черным с явным темно-синим оттенком. Солнце слепило глаза при прямом взгляде на него через один из иллюминаторов. Солнечное сияние было невероятно интенсивным». Теперь о подобных наблюдениях сообщают космонавты из космического пространства.

Свечение ночного неба слабо влияет на визуальные наблюдения с поверхности Земли из-за недостаточной чувствительности глаза. Во время экспонирования фотопластинок и фотоумножителей приходится ограничивать. Поэтому атмосфера очень сильно мешает фотографированию слабых туманностей, яркость которых может быть значительно слабее диффузного свечения ночного неба.

Невысокое качество изображения создает непреодолимый барьер как для визуальных, так и для фотографических наблюдений мелких деталей поверхности на Луне и планетах. Ни глаз, ни фотография не способны различить детали с угловыми размерами меньше некоторого предельного значения. Этот предел в лучшем случае равен $0,1''$, что соответствует теоретической разрешающей способности телескопа диаметром 1,1 м. Теоретическая разрешающая способность обратно пропорциональна диаметру объектива телескопа и поэтому составляет $0,5''$ при апертуре 23 см. Визуальные наблюдения ярких объектов эффективнее, чем фотографические, ведь глаз способен регистрировать детали в те редкие мгновения, когда качество изображения почти идеально, а фотография требует заметного времени экспозиции, в течение которого качество изображения заметно меняется. Разрешающая способность фотографий Луны редко превышает $1''$, что соответствует 1,6 км на Луне. Таким образом, относительно небольшие телескопы при хороших условиях наблюдений могут вознаградить терпеливого наблюдателя прекрасным видом лунных образований. Телевизионные трубки, имеющие гораздо большую чувствительность, чем фотоэмульсия, могут иногда соревноваться с глазом в обнаружении мелких деталей.

Чтобы свести к минимуму нежелательное влияние атмосферы, астрономы исследовали разные уголки Земли, а ныне и области за ее пределами в поисках мест с хорошими условиями для наблюдений. Горные вершины возвышаются над слоями концентрации пыли и водяного пара, поэтому атмосфера над ними обычно очень прозрачна. Но условия наблюдений на произвольно выбранной горе без специальных предварительных исследований могут оказаться хуже, чем на уровне моря. Лучшие места для астрономических наблюдений, как теперь вл-

ячено, находятся в чилийских Андах. Можно устанавливать телескопы на высотных аэростатах и самолетах, однако единственным идеальным решением проблемы качества изображения представляется вывод телескопов в космическое пространство.

Как мы отмечали выше, чем больше телескоп и чем лучше качество изображения, тем более мелкие детали он позволяет различить. При плохих условиях наблюдений изображения планеты или Луны в большом телескопе могут быть даже хуже, чем в маленьком, так как чем протяженнее область, тем сильнее вариации атмосферных условий в ней. Следовательно, для прямых визуальных исследований обычно эффективнее всего телескопы умеренных размеров (диаметром от 15 до 50 см). Мощные рефлекторы (зеркальные телескопы) используются почти исключительно с регистрирующими устройствами, в этом случае их огромная светособирающая способность используется максимально. Отношение фокусных расстояний объектива и окуляра называется увеличением телескопа. По желанию увеличение можно менять, меняя окуляр. Большое увеличение используется при хорошем качестве изображения, меньшее — при плохом качестве изображения.

Вид Луны в телескоп любого размера захватывающее зрелище. Первым человеком, который испытал это удовольствие и увековечил свои наблюдения для потомков, был Галилей. Даже со своим маленьким несовершенным телескопом он обнаружил горы, кратеры и протяженные темные области, похожие своими очертаниями на «человека на Луне». Темные области казались ему большими морями, заполненными водой, поэтому он называл их *maria* (лат. «моря»).

На рис. 83, на котором изображена полная Луна, условия для наблюдения морей благоприятны. Названия некоторых из них, а также других привлекающих внимание характерных лунных образований приведены на рис. 84. Трудно объяснить, почему для лунных морей выбраны те или иные названия, хотя названия Море Спокойствия, Море Ясности и Море Холода кажутся вполне подходящими. Конечно, это не привычные нам моря, а огромные равнины, довольно плоские, если не учитывать кривизну поверхности Луны, лишенные воздуха и воды.

Море Дождей и Море Ясности (на рис. 83 сверху в центре) имеют большие размеры, они почти круглые по форме и четко очерчены. Наибольший диаметр Моря Дождей превышает 1100 км, а Моря Ясности 700 км. Участок Моря Дождей показан крупным планом на рис. 85. Справа внизу Море Дождей охвачено величественными Апеннинскими. Эта горная цепь поднимается над уровнем равнины на высоту около 6 км, так что ее название полностью оправданно. Благодаря теням, придающим изображению глубину, можно заключить (рис. 85), что Апеннины круто поднимаются со стороны дна моря и отлого спускаются наружу. Видны многочисленные глубокие долины и разрывы. Эта горная система подобна земным горным цепям, в которых долины возникли в результате водной эрозии. Однако, как показали образцы лунного грунта, доставленные на Землю по программе «Аполлон», на Луне вет и никогда не было воды.



Рис. 83. Лучевые структуры в полнолуние. Обратите внимание на величественные системы лучей кратеров Тихо (ниже центра), Коперника и Кеплера (слева от центра), а также на многочисленные кратеры с яркими кольцами (Фото Ликской обсерватории).

Параллельно внутреннему склону Апеннин располагается длинная, несколько изогнутая *борозда* или желоб. На Луне найдено несколько сотен борозд. Они представляют собой желобоподобные углубления в сотни метров глубиной, тянущиеся по поверхности Луны на десятки километров. Поскольку борозды обычно не имеют ответвлений, которые существовали бы, если бы борозды образовались вследствие эрозии, и поскольку их стенки не поднимаются выше окружающего лунного ландшафта, наиболее разумно считать их трещинами. Вероятно, в процессе охлаждения лунная поверхность местами растрескивалась. Длинные и глубокие трещины могли также заполняться подповерх-

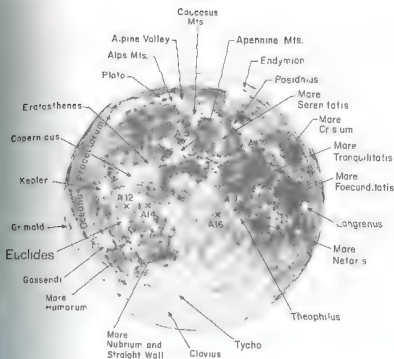


Рис. 84

Названия различных типовых образований, изображенных на фотографии (рис. 83). Места посадки космических аппаратов серии «Аполлон» отмечены буквой А и соответствующим индексом (По Дж. Сингарелле.)

Calceus Mts Кавказ, Apennine Mts Апеннины, Endymion Эндимион, Posidnius Посидоний, Mare Serenitatis Море Ясности, Mare Crisium Море Кризисов, Mare Tranquillitatis Море Спокойствия, Mare Foecunditatis Море Изобилия, Langrenus Лангрен, Mare Nectaris Море Нектара, Theophilus Теофил, Tycho Тихо, Clavius Клавий, Mare Nubrium and Straight Wall Море Облаков и Прямая Стена, Mare Imbrium Море Влажности, Gassendi Гассенди, Euclides Евклид, Grimaldi — Гримальди, Kepler Кеплер, Copernicus Коперник, Eratosthenes Эратосфен, Plato Платон, Alps Mts Альпы, Alpine Valley Альпийская Долина, Oceanus Procellarum Океан Бурь, Mare Imbrium — Море Дождей.

ностным расплавленным веществом, которое могло переливаться через их края, что проявляется в образованиях разного типа. Слабовыраженная длинная борозда ниже центра (рис. 85), по-видимому, является продолжением системы борозд такого типа. Большую грешину, которая когда-то возникла у подножия Апеннин, на части ее протяжения можно



Рис 85 Море Дождей. Луна в третьей четверти (Фото обсерваторий Маунт-Вилсон и Маунт-Паломар)

рассматривать как борозду, в другой части как гребень, а в промежутке она полностью покрыта расплавленным веществом.

Горы вверху справа на рис. 85 называются Альпами. Самой примечательной их особенностью является Альпийская долина гигантский разрыв в середине цепи. Долина имеет плоское дно, в самой широкой части ее ширина достигает 10 км, а протяженность составляет 120 км. На великолепной фотографии области Альпийской долины (рис. 86), полученной в рамках программы исследований Луны США, хорошо заметны центральная борозда в долине, много других борозд и нерегулярное расположение горной области.

Картина пересеченных периферических областей Моря Дождей на рис. 85, сильно отличающаяся от однообразной картины на рис. 83, объясняется не более высоким контрастом рис. 85 и не более крупным масштабом. Дело в том, что рис. 83 сделан в полнолуние, когда лучи Солнца падают вертикально, не образуя теней. Другой снимок (рис. 85) сделан, когда Солнце светит слева и находится высоко над местным горизонтом, поэтому все детали отбрасывают длинные тени поперек направления луча зрения земного наблюдателя. Правый край рис. 85, за исключением высоких горных пиков, из-за кривизны поверхности Луны не освещен. Особенности рельефа видны в наиболее благоприятном для наблюдений положении вдоль *терминатора* границы раздела между темной и освещенной частью Луны. При косом освещении длинные тени выдают детали рельефа, невидимые при прямом падении лучей. Поэтому Луну лучше всего наблюдать близ первой и третьей четверти, когда на терминаторе солнечные лучи почти перпендикулярны лучу зрения земного наблюдателя. В полнолуние можно различить только темные и светлые области и многие образования пропадают.

По длине тени можно довольно точно измерить высоты лунных образований. На рис. 87а изображен расположенный в верхней правой части Моря Дождей изолированный горный пик Питон с дополнительным увеличением, чтобы лучше была видна тень. Длину тени можно измерить, а угол падения лучей вычислить, зная фазу Луны и координаты горы. Геометрию определения высоты иллюстрирует рис. 87б. Вычисления просты, но несколько запутаны из-за необходимости учета нескольких углов. Этот метод хорошо служит и в нашу космическую эпоху, несмотря на то что большое значение приобрели радиолокационные измерения высоты.

Почти вся поверхность Луны усеяна кратерами, они лучше всего видны вблизи терминатора. Разнообразие кратеров ясно видно в Море Дождей, где они разбросаны по открытой равнине. Некоторые из них кажутся гладкими и плоскими внутри, тогда как в других видны одна или несколько центральных гор. Часто внутри кратеров имеются более мелкие кратеры. Кольцевые валы кратеров густы и там едва возвышаются над равниной, некоторые из них незамкнуты. При подробном исследовании выявляется, что лунная поверхность буквально испещрена бесчисленными мелкими кратерами (кратерочками и кратерными ямками), словно Луна была обстреляна дробью. Самые мелкие кратеры, раз-



Рис. 86

Область Альпийской долины (С любезного разрешения НАСА США)

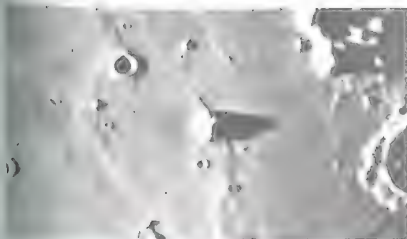


Рис 87а

Питон — изолированный горный пик в Море Дождей. Луна в третьей четверти (Фрагмент фотографии Ливской обсерватории.)

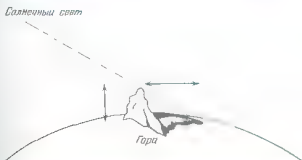


Рис 87б

Лунная гора. Длина теней, отбрасываемых лунными образованиями, даст возможность измерить их высоту. Ср. с рис 87а

личимые на фотографиях, сделанных с земной поверхности, обычно имеют диаметры 1-2 км.

По форме кратеры можно разделить на несколько типов. Поскольку не бывает двух абсолютно одинаковых кратеров и поскольку определения не всегда четки или единообразны, нет необходимости подробно описывать все многообразие типов. У многих кратеров дно плоское, как поверхность морей, а валы круто поднимаются над дном, определяя их края, они называются кратерами с козырьковыми валами. Дно может лежать выше или ниже среднего уровня окружающей местности. Круп-



Рис. 88

Густо усеянная кратерами область. Южная часть Луны в третьей четверти (Фото обсерватории Маунт-Вилсон и Маунт-Паломар)

нейший четко очерченный кратер на видимой стороне Луны Клавий относится к кратерам с кольцевыми валами; наибольший диаметр между противоположными боковыми поднятиями равен 235 км. Клавий виден ниже центра рис. 88. Из-за кривизны лунной поверхности наблюдатель, находящийся в центре кратера, не смог бы увидеть его вал высотой 6,6 км.

Кратер Тихо, видимый немного ниже центра рис. 88, относится к несколько иному типу кратерных образований, часто называемых кольцевыми горами. Лишь небольшая часть его дна плоская, при этом кратер по форме напоминает блюдце. Кольцеобразный внутренний склон горного окаймления иногда выглядит слоистым или террасированным. Эти обрамленные горами кратеры тоже почти совершенны по форме, они почти круговые, иногда в них видны более мелкие кратеры или деформации другого рода. Таким образом, кольцевые горы имеют признаки, свидетельствующие о более позднем формировании, чем кратеры с валами, несущими на себе следы последующих разрушений. Другие прекрасные примеры кольцевых гор Эратосфен (рис. 85 сверху справа) и Коперник (рис. 89 и 90). Оба они громадные ударные кратеры.

Сильно пересеченные области Луны (рис. 88) буквально насыщены кратерами: кратеры в кратерах и кратеры на кратерах. Представляется, что все они образовались совершенно случайно, причем более свежие кратеры появлялись безотносительно к тем событиям, которые происходили здесь раньше. Могут остаться участки валов от старых кратеров, частично разрушенных молодыми, а молодые в свою очередь могут быть покрыты осинками мелких кратеров, образовавшихся еще позднее.

Через горы и моря тянутся системы светлых лучей, которые лучше всего заметны в полнолуние (рис. 83), но почти исчезают в других фазах (рис. 82). Наиболее заметная система исходит из кратера Тихо (диаметр 87 км), лучи от которого можно проследить почти вокруг всей Луны. На рис. 88 лучи почти не видны, и кратер Тихо выглядит обычным кратером, ничем не выделяющимся среди других. Лучи не отбрасывают теней, их выдает только светлая окраска. Они не прерываются ни лунными горами, ни какими-либо другими топографическими деталями. Это, конечно, следы вещества, разлетевшегося из больших, относительно недавно образовавшихся ударных кратеров.

Обратите внимание на сложные структуры около кратеров Коперник и Кеплер на рис. 83. Светлую окраску имеют и кратеры, из которых исходят лучи, выделяются также кольцевые валы многих кратеров. Область кратера Коперник на рис. 83, снятую в полнолуние, не так-то просто отождествить на рис. 89, снятом в более поздней фазе. Яркие кольца кратеров на рис. 89 легко обнаружить и на рис. 83, тогда как некоторые из больших кратеров с нечеткими краями практически исчезли. Тщательное сравнение двух фотографий весьма поучительно. Второй по размерам кратер на рис. 89, Эратосфен, лишь с трудом можно отыскать на рис. 83, хотя он относится к тому же типу, что и кратер

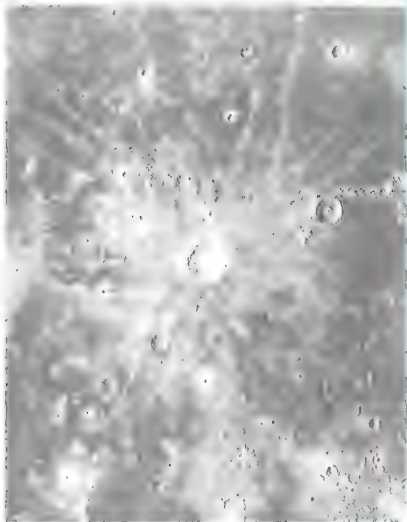


Рис. 89 Кратер Коперник. Луна после третьей четверти. Ср. с рис. 83, 90 и 91 (Фото, полученное на 2,5-метровом телескопе обсерватории Маунт-Вилсон и Маунт-Паломар)

Коперник. Диаметры кратеров Коперник, Эратосфен и Кеплер равны соответственно 93, 58 и 32 км.

Справа от кратера Коперник (рис. 90) расположены несколько цепочек кратеров, образующих своего рода узор. Такие цепочки редки на лунной поверхности. Они лучше всего заметны при наблюдениях

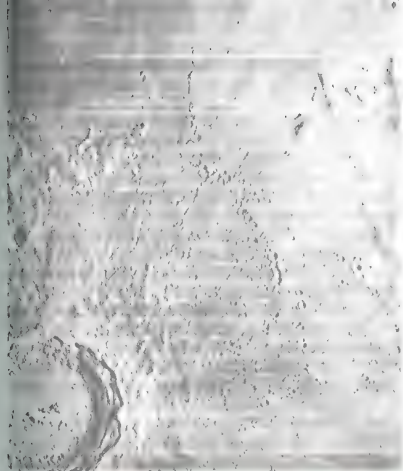


Рис. 90. Окрестности кратера Коперник сфотографированные американским космическим аппаратом «Лунар Орбитер-4» (С любезного разрешения НАСА США.)

с большим увеличением при хорошем качестве изображения. На снимке с большим увеличением снимке окрестностей кратера Коперник (рис. 90, 91) видны конусообразные горы, похожие на вулканические купола или вулканические проходы. Некоторые из них имеют центральные кратеры и напоминают земные вулканы типа Везувия.

На плоских равнинах Моря Дождей (рис. 85) можно видеть длинные змеевидные гребни. Некоторые из них частично закрывают более древние образования, многие представляют собой крошки застывших лавовых потоков.

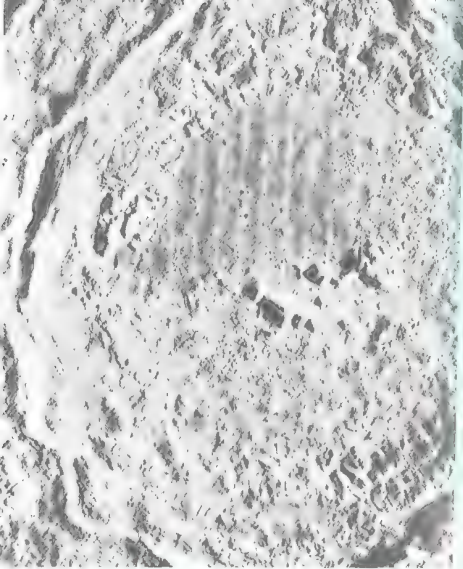


Рис 91. Кратер Коперник, диаметр 93 км (С любезного разрешения НАСА США)

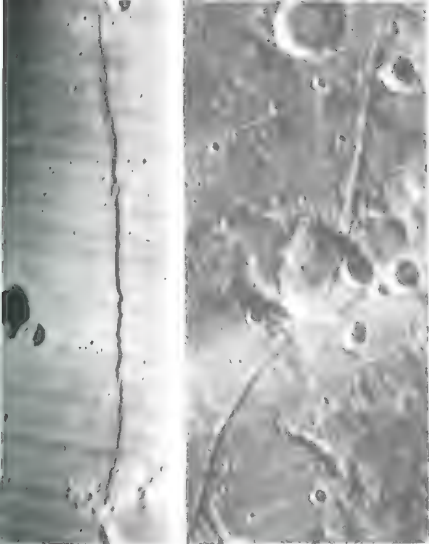


Рис. 92

Слева — Прямая Стена при освещении с востока отбрасывает лунную тень, ср. с рис. 88, ширина области на снимке 62 км. Справа — та же часть трещины Сиреттия в Океане Бурь близ кратера Трималхи представляет собой лунный грабен, ширина области показанной на снимке, 90 км. (С любезного разрешения НАСА США.)



Рис. 93

Часть обратной стороны Луны, сфотографированная американским космическим аппаратом «Лунар Орбитаер-4», центр 1/3 диска для земного наблюдателя (около восточного лимба (с любезного разрешения НАСА США))

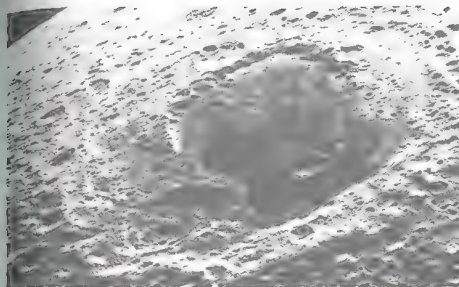


Рис 94. Море Москвы единственное море обратной стороны Луны; его поперечник около 350 км (с любезного разрешения НАСА США.)

Еще одно интересное лунное образование видно на рис. 92 — это Прямая Стена длиной около 113 км, видимая также на рис. 88. На рис. 88 Солнце светит слева, и Прямая Стена видна как белая линия (стена от нее расположена более короткая изогнутая борозда). Фотография рис. 92 (слева) была получена почти сразу после первой четверти, так что Солнце светит справа. Прямая Стена здесь видна как темная линия, это означает, что данное образование представляет собой крутой обрыв или стену. Согласно измерениям, значительная ее часть возвышается на 660 м над равниной. Однако она вовсе не так крута, как кажется. Дж. Ашбрук нашел, что ее наклон не превышает 40°; очевидно, это сброс горных пород, в результате которого один край поднимается над другим. Вероятно, происхождение этого и других подобных обрывов на Луне связано с сильными лунотрясениями в далеком прошлом. Подобные сбросы, часто встречающиеся на Земле, но меньшего масштаба, связаны с эпицентрами землетрясений. На Луне можно проследить мощные системы параллельных трещин и сбросов, что указывает на существование в далеком прошлом напряжений в поверхностном слое и деформаций под действием внутренних сил. На рис. 92 (справа) виден лунный грабен в области, где поверхностный слой испытывал напряжение, и образовавшаяся трещина была заполнена веществом.

Обратная сторона Луны раскрыла свою тайну. Запущенная 4 октя-

бря 1959 г., советская автоматическая межпланетная станция «Луна-3», совершила облет Луны и впервые сфотографировала ее обратную сторону. С тех пор американские космические аппараты «Лунар Орбитер» и «Аполлон» выполнили обзор почти всей лунной поверхности, передавая на Землю фотографии очень высокого качества и разрешения. На рис. 93 изображена обратная сторона Луны, а на рис. 94 — единственное море обратной стороны. В середине нижней части рис. 93 заметен же-лоб, тянущийся с севера на юг на 240 км и во многом напоминающий Альпийскую долину.

Главный сюрприз, который преподнесла ученым обратная сторона Луны, — отсутствие морей. Видимая сторона почти наполовину покрыта морями, а на обратной видно лишь одно и относительно небольшое¹. Ни одна из предложенных гипотез пока еще не дает полностью обоснованного научного объяснения этого факта. Многие астрономы отдадут предпочтение теории Дж. Вуда, согласно которой вследствие притяжения Земли видимая сторона Луны подвергалась более интенсивной бомбардировке крупными телами типа астероидов, чем обратная.

На лунной поверхности много интересных образований: отдельные кратеры с необычной структурой, своеобразные борозды, лучи, моря, горы и сбросы, и потребовалось бы слишком много времени и места, чтобы их описать. Читатель может сам изучить Луну по фотографиям, приведенным в настоящей книге и других изданиях, или с помощью наблюдений на почти любом телескопе. Огромная коллекция фотографий, переданных космическими аппаратами «Рейнджер», «Сервейер», «Лунар Орбитер» и «Аполлон», дает возможность посвятить всю жизнь подробному изучению Луны. Каждый желающий может изучить названия отдельных лунных образований по крупномасштабным картам. Названия примерно 2000 образований утверждены Международным астрономическим союзом; еще многие тысячи деталей нанесли на карту усердные селенографы. В настоящее время крупномасштабные снимки, сделанные с борта космических аппаратов, обеспечили специалистов-картографов работой, сравнимой по объему с составлением карт самой Земли.

Более серьезные наблюдатели могут присоединиться к преданным делу любителям, которые внесли существенный вклад в изучение Солнечной системы. Во многих странах имеются группы, которые патрулируют поверхности Луны и планет в поисках изменений, которые профессиональный астроном может пропустить. Даже при современном прогрессе наблюдательной астрономии профессионалов слишком мало, чтобы полностью обеспечить программу наблюдений на телескопах

9

Природа Луны

Выдающимся научно-техническим достижением человечества, несомненно, являются экспедиции человека на Луну и его благополучное возвращение на Землю. Прилунение пилотируемых аппаратов «Аполлон» — кульминация программы «жестких» и «мягких» посадок, начало которой было положено жесткой посадкой советской автоматической межпланетной станции «Луна-2» в 1959 г. Большое число фотографий Луны, изучение крупномасштабных изображений, прямые исследования, тонкий анализ образцов лунного вещества, доставленных на Землю экипажами «Аполлонов» и советскими автоматическими космическими аппаратами, сейсмограммы лунотрясений, передаваемые по радио на Землю, изучение степени эрозии материала поверхности «Сервейера-1» за три года пребывания его на Луне, лазерная локация с помощью угловых отражателей, установленных в местах посадки лунных модулей «Аполлонов», изучение высокоэнергичных атомов, ионов и электронов в окололунном пространстве, а также радионастрономические и радиолокационные измерения, наблюдения в инфракрасных и ультрафиолетовых лучах с Земли все это принесло нам колоссальный объем научных данных о Луне. Сейчас мы знаем о внутреннем строении и о поверхности Луны, а возможно, и Марса, больше, чем нам было известно о Земле на рубеже этого столетия. На многие старые вопросы найдены теперь ясные ответы, но в то же время возникли новые, гораздо более сложные и глубокие вопросы. В настоящей и следующих главах мы попытаемся описать тела Солнечной системы в их современном состоянии и обсудить, какой путь они прошли до своего теперешнего состояния, черпая сведения именно из этой кладовой знаний и лишь изредка упоминая более специальные работы.

Экипажи «Аполлонов» подтвердили существовавшее представление о Луне как о грандиозной пустыне. Лунные моря еще более безжизненны, чем каменистые пустыни Земли, а лунные горы суровее, чем земные горы выше границы распространения растительности. Лавовые потоки в жерлах потухших земных вулканов выглядят привлекательнее лунных кратеров (рис 95). На Луне нет погоды — там, где нет воздуха,



Рис 95 Кратер Альфонс, сфотографированный американским космическим аппаратом «Рейнджер-9». На рис 88 то второй кратер вверху справа от центра. (С любезного разрешения НАСА США.)

нет ни облаков, ни дождя, ни звуков. В крошечной тьме лунной пещер царили бы вечные тишина и покой, изредка нарушаемые слабыми лунотрясениями. Если бы паутина затягивала мрачные нити таких пещер, она оставалась бы целой и невредимой миллионы лет.

На тунном небе не увидишь буйства красок — лишь чернота, усеянная огоньками звезд в течение жестокой холодной двухнедельной ночи, а затем ослепительное Солнце в течение столь же длинного дня. И все-таки человека на поверхности Луны подстерегают опасности. Метеоритная пыль может насквозь проколоть его космический скафандр, равно как и герметизированное жилище или же разбросать при ударе о поверхность лунное вещество со скоростью ружейной пули, что может привести к тому же исходу. К счастью, экипажи космических кораблей серии «Аполлон» избежали этой опасности. Но потоки космических лучей и частиц высоких энергий, летящие от Солнца, пронизывали их, не защищенных надежной бровей атмосферы.

Если за время телескопических наблюдений, насчитывающих несколько веков, и произошли какие-либо изменения в лунном ландшафте, то они слишком незначительны или слишком неопределенны, чтобы наблюдатели были уверены в их реальности. Так, с Земли не обнаружимо ни одно из мест посадки космических аппаратов, лишь уголки отражатели, посылающие обратно на Землю лазерный луч, и лунные сейсмографы, передающие по радио данные о лунотрясениях, выдают свое местонахождение.

Исследования Луны показывают, что по лабораторным стандартам лунная атмосфера — практически полный вакуум. Число атомов и молекул в единице объема там составляет менее триллионной доли числа частиц, содержащихся в единичном объеме земной атмосферы на уровне моря; в основном это частицы солнечного ветра.

Скорее всего Луна лишена атмосферы из-за малости ее массы. Сила гравитации на ее поверхности недостаточна, чтобы предотвратить убежание молекул в межпланетное пространство. Любое тело, большое или малое, удаляющееся от лунной поверхности со скоростью, превышающей 2,4 км/с, полностью выйдет из под гравитационного контроля Луны. Это критическое значение скорости убегания лишь немного больше средней скорости молекул водорода при обычных температурах. Поскольку среди молекул всегда есть такие, которые движутся со скоростью, равной или большей скорости убегания, водородная атмосфера должна диссипировать почти мгновенно. Диссипация кислорода и азота будет происходить значительно медленнее, поскольку их молекулы массивнее молекул водорода. Однако в астрономически короткие сроки Луна потеряет любую атмосферу, которую ей удастся приобрести. В настоящее время лунная атмосфера пополняется из межпланетного пространства, главным образом за счет облаков газа, выбрасываемых Солнцем, и газа, теряемого солнечной короной. Эта исключительно разреженная атмосфера непрерывно утрачивается, в то же время бомбардирующие Луну атомы высокой энергии способны выбивать любые более тяжелые атомы, которые, быть может, медленно просачиваются из лунных недр.

Среди активных сил, изменяющих сегодня лунную поверхность, вероятно, наиболее важны следующие: деятельность человека, метеоритная бомбардировка, облучение частицами высокой энергии, в особенно-

сти рентгеновскими и космическими лучами, которые проникают в верхнюю часть поверхностных слоев. Ни один из указанных естественных факторов не может вызвать сильных изменений за время человеческой жизни, однако за сотни миллионов лет они «вспахали» верхний слой ее поверхности, или *реголит*. Человек, вероятно, изменит до неузнаваемости лик Луны, но это дело далекого будущего. В феврале 1967 г. американский искусственный спутник Луны «Лунар Орбiter-1» сфотографировал космический аппарат «Сервейер-1», который совершил мягкую посадку 2 июня 1966 г. в типичной «гладкой» морской области в Океане Бурь. На изображениях видны белоснежное пятно космического аппарата и его тень длиной около 10 м. По фотографиям «Лунар Орбитера» установлено, что в месте жесткой посадки аппарата «Рейнджер-8» образовался кратер диаметром 13 м. Несомненно, в результате других жестких посадок на Луне также появятся подобные кратеры.

При ударе о поверхность Луны метеорной частицы происходит миниатюрный взрыв и во все стороны разбрасываются частицы грунта и метеоритного вещества. При скорости падения частицы 16 км с некоторая доля ее массы после соударения может иметь скорость больше 2,4 км с - скорости убегания с Луны. Поскольку у Луны нет атмосферы, это вещество свободно покинет гравитационное поле Луны, хотя значительная его часть может быть захвачена снова с орбиты Земли.

Диапазон изменения температур от пунного полудня до полуночи очень велик, более 250°C (рис. 96), но температура меняется медленно. На Земле разрушение горных пород связано главным образом с расширением поглощенной влаги при замерзании. На Луне из-за отсутствия воды разрушение могло бы происходить только вследствие попеременного расширения при нагревании и сжатия при охлаждении. Однако благодаря тому что изменения температуры на Луне происходят очень медленно, породы успевают приспособиться к изменению их внутренних температур, так что разрушение за счет последовательного расширения и сжатия также очень медленный процесс.

Зато сильные изменения температуры наблюдаются во время лунных затмений. Э. Петит и С. Б. Никольсон (обсерватория Мачн-Вилсон) впервые измерили температуру Луны в ходе затмения по наблюдениям ее инфракрасного (теплового) излучения. За время около часа температура упала от 71 до -79°C. Такое быстрое изменение температуры может быть более действенным фактором в разрушении оказавшихся на поверхности пород, но только на видимой стороне Луны.

Если бы Земля не смогла удержать атмосферу, ее поверхность, вероятно, была бы такой же бесплодной и неровной как лунная. Современная земная поверхность результат совместного действия воздуха и воды, факторов, которые определили и развитие различных живых организмов. На поверхности Луны жизнь не могла возникнуть, хотя не исключено, что при ее формировании был период времени, когда она обладала заметной атмосферой. Но анализ образцов лунных пород, доставленных на Землю американскими космонавтами участниками экс-

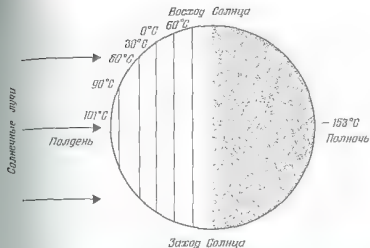


Рис 96 Температура Луны по измерениям Э. Пети и С. Б. Накельсона.

педиций на космических кораблях «Аполлон» и советскими автоматическими станциями «Луна», показал, что они никогда не подвергались действию воды.

Наши знания о расстоянии до Луны и ее температуре были весьма существенно дополнены данными, полученными с помощью радиотелескопов (рис. 97). Можно рассчитать время прохождения посылаемых радиопульсов туда и обратно и определить расстояние до Луны и степень шероховатости ее поверхности. С другой стороны, приемные радиоприемники могут измерять поток излучения, испускаемый поверхностью, и таким образом определять температуру. Все обычные вещества в нагретом состоянии излучают больше энергии во всем диапазоне частот. Радиоволны способны проходить сквозь верхние слои вещества Луны и давать сведения о температуре нижележащих слоев. На длинах волн 30 см и более практически не наблюдается никаких изменений температуры Луны в течение месяца и даже во время затмений, тогда как на все более коротких волнах ближе к инфракрасному диапазону изменения постепенно возрастают. На экваторе, на глубине около 1 м под поверхностью, температура, по-видимому, постоянна и составляет 50°С, а возможно, несколько ниже.

В совокупности эти результаты показывают, что верхний слой лунного грунта состоит из очень пористого вещества, прекрасного теплоизолятора. Этот теплоизолирующий слой имеет низкую теплопроводность и поэтому быстро реагирует на изменения потока солнечного излучения при восходе или заходе Солнца и во время лунных затмений. Измерения поверхности видимого полушария Луны в инфракрасном



Рис. 97 Эта антенна Инженерной лаборатории Сиатловского корабля США (форт Монмут шт. Нью-Йорк) впервые приняла сигналы с Луны радиопередателем, длина волны 1,5 м (Фото архива США.)

диапазоне показали, что многие участки во время затмений и лунными «вечерами» остаются теплее, чем поверхность в среднем. Рис. 98 иллюстрирует распределение таких участков, которые охватывают все молодые (светлые пятна) кратеры, такие, как кратер Тихо, и некоторые мо-



Рис 98

Инфракрасное изображение Луны во время затмения. Видны светлые пятна, остывающие медленнее чем остальная поверхность (с рис. 83 и 84 для отождествления некоторых кратеров и морей. (С любезного разрешения Р. У. Шортхилла и И. М. Саари, *Boeing Aircraft Co*)

ря, на лунных материках сравнительно мало таких «горячих» пятен, если исключить молодые кратеры.

Отсюда можно сделать вывод, что в областях Луны, позднее подвергшихся бомбардировке, еще не успел образоваться такой толстый теплоизолирующий слой, как в старых областях. Поэтому тепло, накопленное в течение лунного дня скальными породами, обладающими достаточно высокой теплопроводностью, излучается в течение ночи (Вспомните, как пышет теплом каменная стена, освещавшаяся Солнцем после полудня, ранним вечером.) Такой материал с технической точки зрения обладает более высокой тепловой инерцией по сравнению, например, с пробкой. Наблюдения не дают никаких указаний на то, что

какие-либо участки Луны излучают тепло внутренних источников, скажем вулканической природы.

Поскольку пыль в вакууме является превосходным теплоизолирующим материалом, в течение долгого времени считалось, что быстрые изменения температуры во время лунных затмений свидетельствуют о пылевой природе верхнего слоя Луны. Сильное возрастание яркости Луны близ полнолуния указывает, что поверхность необычайно шероховата с характерными размерами шероховатостей меньше миллиметра. Это предположение подтверждено высаживавшимися на Луну космонавтами. Полное количество отраженного Луной света за двое суток до полнолуния удваивается, а в полнолуние ее поверхность кажется равномерно яркой вплоть до края диска. Радиолокационные наблюдения на длинных волнах показывают, что поверхность Луны довольно гладкая, причем около половины площади имеет угол наклона более 8° относительно сферической поверхности. По другим данным моря представляются более гладкими, чем кратеры и материки. По радиолокационным измерениям, проведенным в Лихольновской лаборатории Маскачусетского технологического института, на волне 8 мм ее поверхность более шероховата, чем дают измерения на более длинных волнах. Центральная отражающая область в этом случае много больше. Но в видимом и инфракрасном свете Луна кажется почти равномерно освещенной.

Советская автоматическая станция «Луна-9», совершившая мягкую посадку 31 января 1966 г., впервые дала нам возможность увидеть Луну крупным планом (рис. 99). Затем американские космические аппараты «Сервейер» и пилотируемые корабли серии «Аполлон», экипажи которых доставили на Землю образцы лунного грунта, дали богатую информацию о ряде районов Луны. Поверхностный слой очень рыхлый, размеры частиц по порядку величины составляют несколько тысячных сантиметра, всюду хаотически разбросаны камни размерами с гальку. Частицы лунного реголита довольно слабо связаны, поэтому космонавты совершившие посадку на Луну, оставили четкие следы подошв около сантиметра глубиной (рис. 100). Если их не уничтожит человек, они будут существовать в течение миллионов лет.

Стенки траншей, вырытых в грунте, почти не осыпаются, следовательно вещество связано хотя и слабо, но все же сильнее, чем свежевспаханная почва. При ударе оно медленно разваливается на куски, что подтверждает довольно значительную хрупкость вещества. Другими словами, при умеренных давлениях вещество не очень сильно сжимается, что указывает на внутреннюю структуру с некоторым сцеплением. Плотность поверхностного слоя несколько выше плотности воды. Вещество пористое, и на глубине больше нескольких сантиметров его плотность и твердость возрастают.

Отдельные немногочисленные камни выступают над слоем реголита или лежат прямо на поверхности, по-видимому, они были выброшены при ударах метеоритов, породивших кратеры. Обратите, например, внимание на протяженные следы скатившихся валунов на рис. 101. Длинные крутые склоны на Луне редки, если не учитывать стенки крат-



Рис 99

Первая гора на лунной поверхности переданная советским автоматическим спидометром «Луна-9». Поверхность лунного камня, видимого на переднем плане, 30 см

геров. Мы уже отмечали, что Прямая Стена имеет средний наклон всего 40°, средний наклон внутренних склонов кратера Тихо составляет лишь 17°. Изображения Луны, переданные космическими аппаратами «Рейнджер», показывают, что наклон только 0,01 площади поверхности превышает 13°. Длинные тени, отбрасываемые вблизи терминатора, создают обманчивое впечатление неровности лунных образований. К примеру пик Питон (рис 87а) высотой 2 км над дном моря, в основании превышает 20 км и имеет плоскую вершину.

Наконец-то разгадана одна из главных загадок лунной поверхности, почему поверхность такая темная? Мелкая пыль от разрушенных скальных пород обладает более высокой отражательной способностью, чем лунная поверхность. Изображение канавки, вырытой совком «Сервейера-3», показывает, что самый верхний слой (менее миллиметра толщиной) несколько светлее, чем вещество, лежащее на большей глубине. Но почему более глубоко расположенный материал очень темный и почему некоторые камни гораздо светлее? Одно время думали, что поверхность медленно темнеет под действием высокоэнергичных ионов солнечного ветра.

Как показало всестороннее исследование образцов лунного грунта,

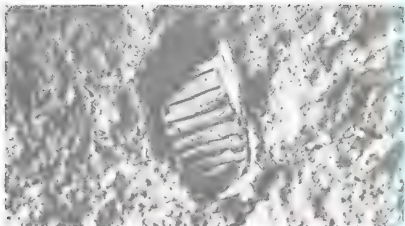


Рис. 100 След одного из членов экипажа «Аполлона-11». Пейзаж Астерограда или Элиаса Олдрива м.п. оставлен на Луне 24 июля 1969. Это первые человеческие следы на Луне (С любезного разрешения НАСА США)

крупиды вещества покрыты тонкой оболочкой, которая поглощает свет, поэтому они и выглядят темными. Образование оболочек обусловлено двумя процессами, действующими совместно в практически полном вакууме на лунной поверхности: частицы солнечного ветра выгоняют атомы, а удары микрометеорных частиц вызывают испарение вещества. Ударяясь о поверхность крупинок, атомы прилипают к ним. Более тяжелые элементы, такие, как железо и титан, лучше прилипают, чем легкие, такие, как кислород и азот. Поэтому на частицах лунного грунта медленно образуется крайне тонкое темное покрытие. В настоящее время вследствие вспахивания под действием ударов метеоритов реголит перемещивается со скоростью порядка 1 см за 10 млн. лет, в результате частицы, лежащие глубже, выглядят более темными. Для примера рассмотрим пробу, взятую буром «Аполлона-17». Вещество представляет собой мелкозернистый материал до глубины 18 см, ниже встречаются крупнозернистые частицы. Возраст кратера, определенный по выскрипавшимся в вещество частицам солнечных вспышек, составляет около 100 млн. лет. В результате образования кратера область покрылась крупнозернистой галькой. Поскольку крупнозернистый материал находился на склоне холма, он впоследствии был покрыт сверху слоем сбитого со склона вещества толщиной, вероятно, 25 см. Пробуренная «Аполлоном-17» скважина находится в неглубокой выемке, что указывает на значительно более позднее образование и верхнем слое очень маленького кратера, который был частично засыпан.

В некоторых мелких кратерах заметны одна или даже две террасы.



Рис 101

Силы капающих лавов. Изменены цвета, чтобы выделить. Они находятся на внутренней стенке 45-километрового кратера. Ширина более широкого левого следа достигает 25 м (с пометкой разрешения НАСА США.)

это указывает на существование более твердого пласта или пластов на глубинах от нескольких метров до десятков метров. Такая слоистость лавовых потоков обнаружена в нескольких изученных морских районах. К тому же эти морские районы усеяны кратерами, диаметры которых меньше 15-100 м. Здесь новые кратеры перекрывались со старыми и налагались на них, что привело к статистически равновесному распределению кратеров. Появление новых кратеров не изменило бы общего вида поверхности.

На всех крупномасштабных изображениях Луны видно, что валы некоторых четко очерченных «молодых» кратеров имеют светлую окраску, а у некоторых вал того же оттенка, что и окружающая местность. Специалисты по баллистике считают, что это связано со скоростями метеоритов. При малых скоростях падение метеорита вызывает взрыв

со скоростью, меньшей скорости звука, и разрушенный материал просто выбрасывается. Но при скоростях падения 10 км/с и выше, типичных для метеоритов, приходящих из глубин космического пространства, значительная часть вещества расплывется в виде очень мелкой пыли и поэтому образуется светлый вал. На рис. 102 приведено изображение кратера со скалистыми стенками, образованного при сравнительно слабом ударе, и его окрестностей.

Протяженные светлые лучи, исходящие из больших молодых кратеров, такие, как у кратера Тихо, нельзя объяснить только светлой пылью. Изображения, переданные космическим аппаратом «Рейнджер-7», подтвердили вывод, сделанный Койпером на основании наземных оптических наблюдений, что светлые лучи образованы шероховатым и каменистым материалом. Большие камни, подобные видимым на крупномасштабных снимках, могли бы достаточно плотно покрывать эти участки поверхности, чтобы они оставались относительно светлыми в течение долгого времени, пока лучевые структуры не исчезли бы под обломками породы, выброшенными из более удаленных областей Луны. Однако увеличение относительной яркости лучей в полнолуние требует дополнительного объяснения. Возможно, этот эффект вызывается их очень сильной шероховатостью. «Тень» самолета, летящего на большой высоте, выглядит светлым пятном на обычных грунтовых поверхностях и темным пятном на водной поверхности. Так, лучи солнечного света, отраженные от ливня по направлению к Солнцу, могут возвратиться к глазу по своему первоначальному пути (рис. 180). При отражении под другими углами к наблюдателю приходит меньше света. Поэтому если светлые лучи на Луне более шероховаты в крупном масштабе, чем в значительно более мелком масштабе всей Луны, то их истинное высокое альbedo проявится в полнолуние.

До космической эры в течение многих лет высказывались интересные соображения о происхождении характерных образований лунной поверхности. Проявлялась ли на Луне такая же как на Земле вулканическая и тектоническая активность, сопровождавшаяся образованием больших вулканических кратеров и извержением лавы? Или же основным агентом, формировавшим ее поверхность, всегда была метеоритная бомбардировка? Была ли Луна когда-нибудь расплавлена хотя бы частично?

Поищем на лунной поверхности свидетельства расплавления вещества и вулканической активности. Во многих материковых областях Луны, особенно на обратной стороне, мы находим хаотические нагромождения кратеров на кратеры. Напротив, поверхности морей выглядят относительно гладкими и содержат гораздо меньше кратеров промежуточных размеров на единице площади. Однако здесь присутствуют многочисленные признаки вулканической или тектонической активности: цепочки кратеров возле большого кратера Коперник (рис. 89), а также вулканические кратеры и купола в области к востоку от Коперника (рис. 90). В замечательном кратере Варгенин (рис. 103) отчетливо видно, что лава действительно поднималась до краев кратерных стенок



Рис 102 Кратер диаметром 60 м в Океане Буре, усеянный ватнами метровых размеров (с побечного разрезания НАСА США)

и он по существу остался затопленным или же что соседние области позже опустились относительно общего уровня. В вулканах извержение обычно происходит через центральное жерло, как, например, у Везувия, вулканов Гавайских островов и многих других (рис 104). Свидетельства существования на Луне вулканов подобных типов можно видеть на рис. 90 и 91, но во всех этих очевидных случаях вулканы и вулканические купола имеют относительно малые размеры.

На цветных фотографиях Луны с сильно подчеркнутым цветовым контрастом, полученных Уайтекером, заметны пятна неправильной формы в лунных морях. Их очертания совпадают с очертаниями впадин и крутых уступов, очевидно, границ лавовых потоков. Изображения, переданные «Лунар Орбитерами», подтверждают существование таких лавовых потоков, см., например, рис. 105.

Растрескивание, расплавление, оседание, образование гряд и тектоническая активность многих типов встречаются не только в морях, но и в заполненных веществом кратерах, и в равнинных районах материков. Например, изображения участка в кратере Альфонс (рис 106), переданные космическим аппаратом «Рейнджер-9», показывают, что система борозд и большинство мелких кратеров, по-видимому, возникли в результате геологической активности. Многочисленны темные оросды и провалыные кратеры. На дне кратера Аристарх (рис. 107) видны не-



Рис. 103

Кратер Варгентин, два меньших кратера — то Шикара (10730) и Фоштинд (10480). В центре — порочный кратер с двойными Варгентин (Фотография сделана на 3-м роковом рефлекторе Ликской обсерватории)

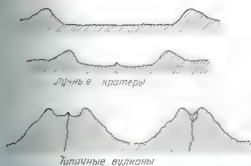


Рис 104 Типичные кратеры и земные вулканы. На схематических разрезах видны основные различия между лунными кратерами и вулканами типа Везувия.

сколько хаотических структур, которые напоминают дно некоторых гавайских вулканов. Еще более хаотична структура дна большого 85-километрового кратера Тихо в материковой области (рис. 108). Мы видим здесь последствия мощного удара, породившего кратер глубиной в десятки километров и приведшего к выбросу вещества, плавлению пород и вторичной вулканической активности грандиозных масштабов. На панораме Океана Бурь в окрестностях кратера Мариус (рис. 109), переданной «Лунар Орбитером 2», заметны не только змеевидные гряды, которые несомненно были образованы потоками лавы или магмы, но и вулканические купола диаметром от 3 до 15 км и высотой 300–450 м, причем у некоторых из них видны кратеры. На крупномасштабных снимках поражает удивительно сложная структура поверхностей морей по сравнению с их однообразием на фотографиях, сделанных с Земли; эта сложность свидетельствует о тектонической активности молодой Луны.

Все крупные кратеры или подавляющая часть их имеют метеоритное происхождение. В 1949 г. Р. Болдуин собрал такое множество свидетельств в пользу метеоритной теории, что к началу космической эры лишь немногочисленная горстка сторонников вулканической теории упорно продолжала ее защищать. Число свежих кратеров на морях хорошо соответствует ожидаемому числу падений больших метеоритов за время от $2 \cdot 10^9$ до $4 \cdot 10^9$ лет. Против метеоритной теории выдвигается контраргумент: если такие крупные метеоритные тела создали большие кратеры на Луне, то на Земле подобные метки должны быть еще многочисленнее из-за более сильной гравитации и, следовательно, больших скоростей падения метеоритов на Землю. И в самом деле Земля несет на себе много следов подобных катастроф в форме криповулканических структур, не говоря о кратерах, таких, как кратер в Аризоне и еще больших размеров в Канаде, показанный на фотографии Битца (рис. 53). Конечно, большие древние кратеры заполнялись веществом,

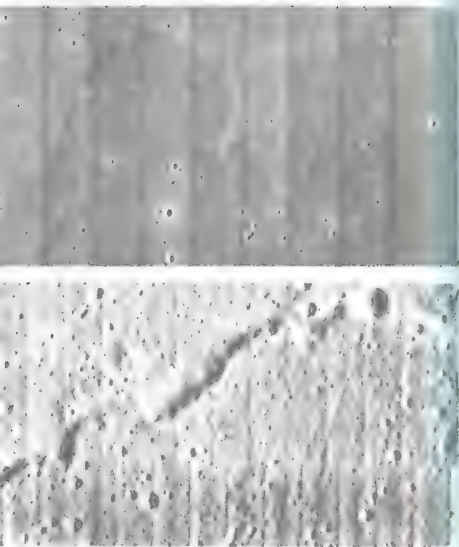


Рис. 105

Лавовый поток в Море Дождей. Вверху — ширина области 27 км. Север слева. Внизу — крупномасштабный снимок того же участка слева от центра, ширина области 4,5 км (С любезного разрешения НАСА США)

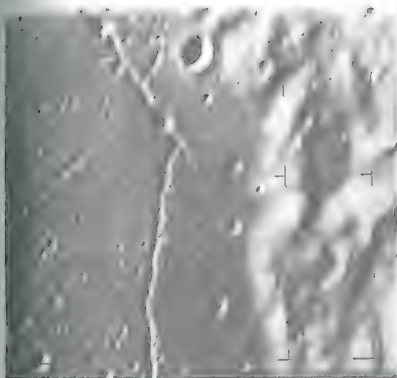


Рис 106

Система борозд в кратере Альфонс. Обратите внимание на кратер с темным ореолом в средней части снимка ввиду Темная окраска, возможно, обусловлена газовым выбросом (С побезного разрешения НАСА США)

размывались, выветривались, поэтому они в значительной мере уничтожены. Например, диаметр кратера Вредсфорт Дом в Южной Африке первоначально достигал 50 км. Описание реликтовых земных метеоритных кратеров содержится в книге Ф. Уотсона „Between the planets”.

При взрывах ядерных бомб также образуются большие кратеры. Падение высокоскоростных метеоритов порождает кратеры самых разнообразных размеров. Схема Э. М. Шумейкера (рис. 110) показывает распределение ударных кратеров в районе вокруг кратера Коперник (ср. с рис. 89 и 90). Мелкие кратеры, диаметром все же порядка километра, были созданы материалом, выброшенным при взрыве, приведшем к появлению кратера Коперник. Нам не известно ни одного примера вулканической активности с таким мощным взрывом, способным выбросить массу вещества в миллионы тонн на расстояния 200 км и даже много дальше. С другой стороны, в этом районе есть и кратеры вулканического типа.



Рис. 107 Участок дна кратера Аристарх. Ширина изображенной области 5,7 км (С любезного разрешения НАСА США.)

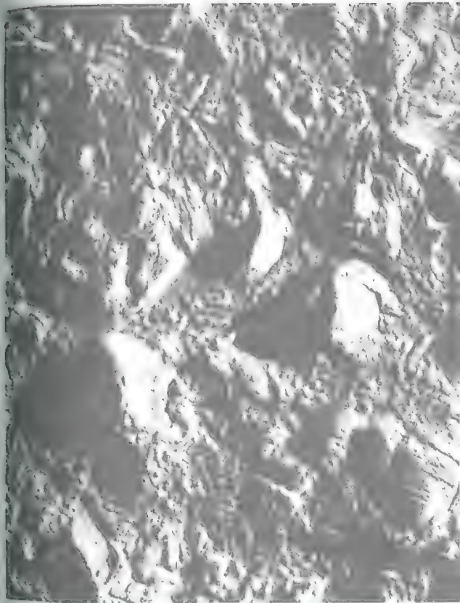


Рис. 108

Пересеченная внутренняя часть лучевого кратера Тихо, ширина области 5 км. (С любезного разрешения НАСА США.)

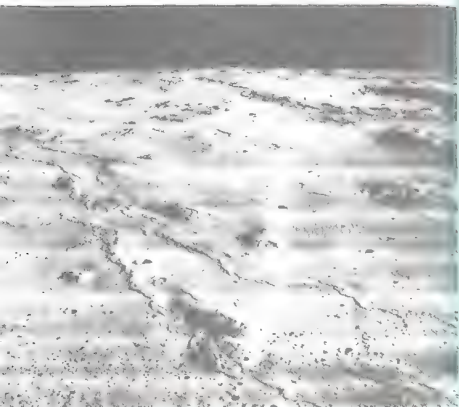


Рис. 109 Панорама участка Океана Бурь, вблизи кратера Мариус (вверху справа) диаметром 40 км и глубиной 1,6 км (С любезного разрешения НАСА США)

У лунных кратеров диаметром свыше 10–30 км, как правило, есть центральная горка и террасы на склонах. Физические теории и численное моделирование мощных ударов объясняют эти особенности. При ударе со скоростью, намного превышающей скорость звука, тело внедряется в скальные породы на глубину, равную нескольким его диаметрам, создавая при этом ударные волны, сжимающие и нагревающие породы мишени. Вещество растекается подобно жидкой грязи, распыляясь и образуя глубокий временный кратер. Грязевые ободки и стенки резко оседают, образуя террасы и заполняя значительную часть кратера. Под действием воды, отразившейся от дна, обвалившееся вещество образует центральное поднятие и небольшие борки. Расплавленные породы, оставшиеся внутри кратера, текут к центру, очагу будущей вулканической активности. Замечательная панорама внутреннего



Рис 1.0 Вторичные ударные кратеры в районе кратера Коперник, с перевернутым изображением на рис. 89 (По Э. М. Шумейкеру)

части кратера Коперник и северного участка стены (рис. 111), полученная американским аппаратом «Лунар Орбитер-3», показывает сложность тектонических процессов, следующих за взрывом метеорита.

А теперь попытаемся ответить на вопрос: являются ли моря следствием вулканической активности или своего рода спусковым механизмом послужили падения необычайно больших метеоритов? Сначала была предложена вторая гипотеза. В конце прошлого века ее высказал и отстаивал крупный геолог Г. Гилберт (1843-1918), в 1949 г. ее поддержал Бодуин. В пользу этой гипотезы свидетельствуют данные космических исследований.



Рис. 111. Панорама кратера Коперник, сделанная космическим аппаратом «Лунар Орбiter 5». Горы на пересечении линий, нанесенных на рис. 89 и 90 как центральные горки при иллюстрации к этим рисункам. (С любезного разрешения НАСА США)

Интенсивное изучение лунной поверхности показывает, что по крайней мере половина видимой поверхности Луны несет следы, глумящиеся от Моря Дождей. Тысячи трещин и заиленных породой долины направлены радиально к точке близ его центра, а системы трещин, горные цепи и другие образования обладают почти круговой симметрией относительно этой точки. Рис. 112, составленный Койпером, показывает район Моря Дождей в проекции, нормальной к лунной поверхности, так что искажения, связанные с перспективным сокращением для наблюдения с Земли, устранены. Койпер выделил замечательный внутренний бассейн, окруженный змеевидными грядами, нарисованными черным цветом. Это почти квадратная область, симметричная относительно вероятной точки удара. Альпийская долина указывает прямо на центральную точку, а протяженные горные цепи вокруг расположены совершенно симметрично по отношению к ней. В пределах этих горных цепей находится внешний бассейн, в котором лежат огромные глыбы



Рис. 1.2 Строение Моря Дождей по Дж. Койперу. Юг вверху.

представляющие собой, по видимому, не разрушенный при образовании моря материал или же вещество, выброшенное в эту область при образовании моря.

Сейчас большинство ученых признают, что громадное метеоритное тело упало в упомянутую точку удара, причем скорость тела имела большую составляющую, направленную к югу (на рис. 112 вверху). Во внутреннем бассейне образовался огромный кратер, а вещество при ударе было выброшено на очень большие расстояния, далеко за центр

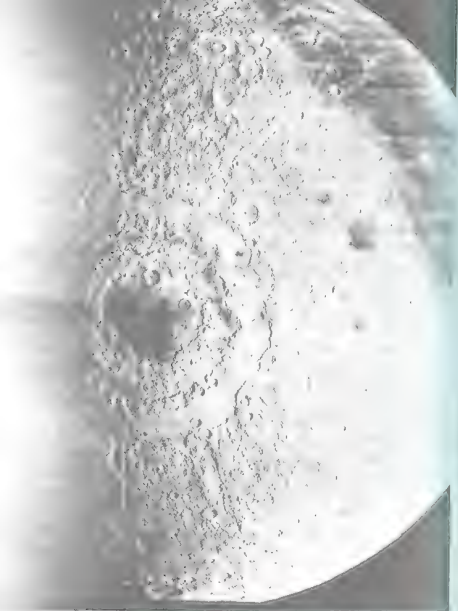


Рис. 113

Море Восточное с центром, лежащим в 9° за восточным полюсом Луны и в 1,5° южнее экватора, по снимкам «Лунар Орбитера-4». Справа сверху — Океан Бурь (с повозного разрешения НАСА США)

видимого с Земли полушария. Метеорит упал как раз тогда, когда внешние слои Луны были частично расплавлены, так что огромную массу, выброшенную из центрального кратера, лунная кора была не в состоянии выдержать. Поэтому область, находящаяся между внешним бассейном и внутренними склонами горных массивов, опустилась. Таким образом, внутренние склоны Альп, Кавказа, Апеннин и Карпат представляют собой сбросы, сформировавшиеся, когда внутренние и первоначально материковые области опустились. Некоторые из этих гор достигают высоты свыше 8 км, однако заметим, что сила тяжести на Луне составляет только одну шестую земной. Поэтому для удержания в равновесии высочайших гор на Луне (из условия упоминавшейся выше изостазии) требуется сила внутреннего давления, примерно эквивалентная силе, необходимой для удержания на Земле гор высотой чуть больше километра. Значит, если в тот период была расплавлена только небольшая доля верхних слоев Луны, то, по-видимому, разумно считать, что нижележащие ненарушенные горные породы обеспечивают поддержание неполного кольца гор, сохранившихся до настоящего времени.

Область Луны вблизи центра диска, простирающаяся в сторону Апеннин и на запад к горам Гем вблизи Моря Спокойствия, кажется тусклой и плохо различимой даже при наилучших условиях наблюдения. Такой необычный вид трудно объяснить. Предполагается, что эта область покрыта толстым слоем частично расплавленного вещества, выброшенного радиально из Моря Дождей. На этом основан вывод Койпера о том, что упавшее метеоритное тело двинулось в южном направлении.

В ходе космических исследований был выявлен еще более эффектный бассейн, чем Море Дождей. Так, Море Восточное (рис. 113) долгое время наблюдалось только частично на лимбе Луны и представало во всей своей красе только при наблюдениях из космоса. Окаймляющие Море горы Кордильеры образуют почти идеальную окружность диаметром около 1000 км и поднимаются на 6 км над равниной, вполне сравнимой по размерам с Морем Дождей. Диаметр внутреннего кольца гор Рук превышает 600 км. Вещество было выброшено за Кордильеры еще на 1000 км и образовало уникальный покров из сложных структур, направленных в основном радиально от центра моря и уничтоживших большинство прежних деталей поверхности.

Гигантские метеориты или ядра комет диаметром в несколько десятков километров, упавшие в Море Дождей и Море Восточное, породили огромные кратеры глубиной в десятки километров и диаметром в сотни километров. Последующий восстановительный процесс магматической перестройки оказался более завершенным в Море Дождей. Море Восточное, по-видимому, более позднего происхождения. Концентрические колыцевые структуры горных обрамлений и просевшие по поверхности требуют объяснения. Являются ли они порождением сверхзвуковых ударных волн при гиперболических скоростях падения метеоритов или они отражают стратификацию слоев на различных

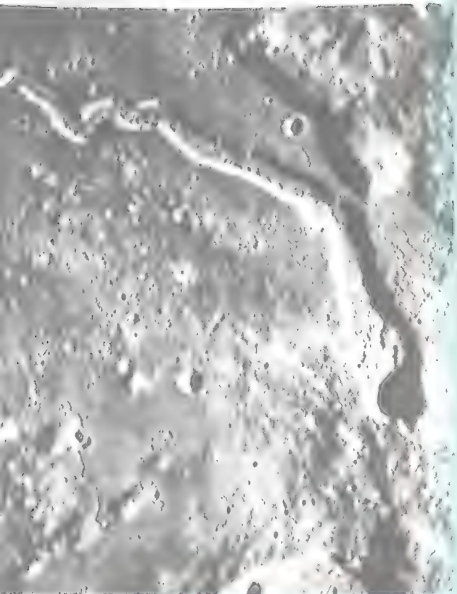


Рис. 114

Вид долины Шретера (ширина области, показанной на снимке 74 км) «Голова козры» очевидно образована выбросом из кратера Аристарх (протяженность 350 км. С любезного разрешения НАСА США)

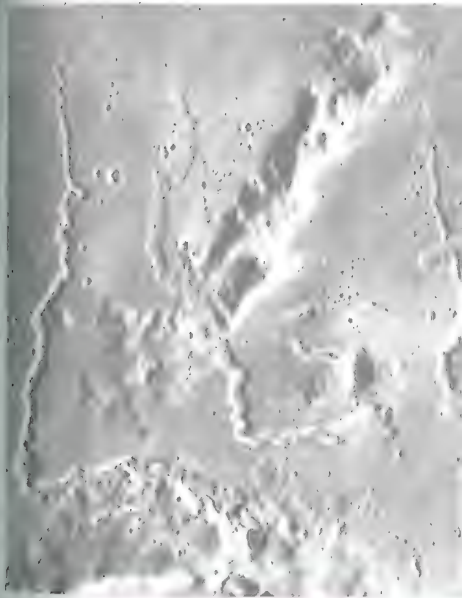


Рис. 115

Извилистые борозды на горном плато Харбингер между морем Дождя и Океаном Бурь. Ширина области 55 км (С любезного разрешения НАСА США.)

глубинах под поверхностью Луны? В настоящее время обычно принимается первое объяснение.

Решающее свидетельство того, что большие моря содержат плотное вещество, а значит, застывшую плотную лаву, получено с помощью искусственных спутников Луны. Их движение показывает, что ускорение силы тяжести над Морем Дождей больше, чем над материками. Из лазерного эксперимента «Аполлона-17» следует, что поверхность морей и большей части видимой стороны Луны находится ближе к ее центру, чем поверхность обратной стороны. Другими словами, фигура Луны не симметрична, расстояние обратной стороны от центра масс в среднем примерно на километр больше, а видимая сторона пониже, вероятно на 2 км. Поверхность морей по форме близка к сферической и покрывает половину полушария, радиус которого на 4 км меньше среднего радиуса.

У Сьюрен и Г. Мюллер, открывшие гравитационные аномалии над морями, предложили для такой повышенной концентрации массы термин *масконы*. Плотность вещества в погруженных под поверхность Луны масконах должна превышать среднюю. Видимая сторона Луны на которой преобладают моря, должна содержать вблизи поверхности вещество более высокой плотности, чем обратная сторона. Кроме того, Луна не может находиться в состоянии изостатического равновесия при котором полная масса, умноженная на ускорение силы тяжести на малых площадях, в сумме даст полную силу тяжести на поверхности. Другими словами, при изостазии не должно быть никаких гравитационных аномалий, никаких масконов. Отсюда следует заключение. Луна обладает значительной прочностью и способна выдержать увеличение массы под морями и масконами. Но важнее то, что эта структурная прочность уже, вероятно, была достигнута, когда формировались моря. Тяжелая базальтовая лава заполняла огромные кратеры, возникшие при мощных ударах, после того как внешние слои Луны толщиной в несколько сотен километров совершенно остыли и затвердели. Ниже мы увидим, как с помощью доставленных на Землю образцов лунного грунта удается подтверждать и датировать предсказанные события.

Вернемся теперь к возобновляющимся время от времени спорам. Создана ли какая-либо из борозд на Луне водными потоками? Мы видели, что простые геологические процессы, разломы, проседания и растрескивания объясняют очень многое. Одни борозды лунные двойники земных грабенных, заполненных породой (рис. 92), зато другие сильно напоминают русла равнинных рек. Лучшее всего известная борозда названа в честь выдающегося немецкого селенографа И. Шретера (1745-1816). Ее верховья изображены на рис. 114, причем глубина в «голове кобры» достигает 1300 м. Другие борозды видны на рис. 115, одна из них перескакивает ряд холмов. Эти и многие другие необычные борозды со слабыми притоками, по-видимому, объясняются совокупным действием нескольких процессов, таких, как разломы, потоки лавы и в некоторых случаях разрушенные лавовые трубки. Геологов удовлетворяет такое объяснение. Кроме того, нет никаких признаков возде-

ствия воды на тунные породы, поэтому следует положить конец полемике.

Самый большой сюрприз преподнесли сейсмографы, установленные в местах посадки лунных модулей «Аполлонов-12, 14-16» (см. рис. 84). Как отмечалось выше, сейсмические волны, порождаемые землетрясениями дают возможность изучать строение земных недр почти так же как рентгеновские лучи позволяют изучать человеческое тело. Луна оказалась на удивление спокойной в сейсмическом отношении, на ней нет ветров, погоды, волн, морских приливов и людей, видоизменяющих поверхность. Вследствие этого сейсмографы для Луны можно делать гораздо более чувствительными, чем земные. Слабеющие землетрясения соответствуют сильнейшим лунотрясениям.

Как и ожидалось, колебания были зарегистрированы при скатывании камней, главным образом со склонов гор, окаймляющих моря, несколько лунотрясений связаны, вероятно, с подповерхностными явлениями и редкие события с падениями метеоритов. Неожиданной оказалась периодичность лунотрясений, сейсмограммы которых совпадают до мельчайших деталей в сериях колебаний. Кроме того, такие лунотрясения, как правило, происходят через аномалистический месяц, т.е. когда Луна находится в перигее или когда она в апогее. Еще одна особенность периодических лунотрясений состоит в том, что как показывает сейсмическая триангуляция, их очаги находятся глубоко под поверхностью. Местонахождение более двух десятков из них было определено точно по нескольким записям каждого. Очаги лежат на глубине от 700 до 1100 км. Лунотрясения регистрируются только на видимой стороне, поскольку они очень слабы и сейсмические волны, по видимому, рассеиваются в центральных более горячих областях Луны (рис. 116).

Очевидно, периодичность лунотрясений можно объяснить приливным воздействием Земли, когда это действие максимально, т.е. в перигее и в апогее. Таким образом получено первое прямое свидетельство существования обусловленных приливными воздействиями явлений на другом небесном теле, еще один пример вулканической активности на спутнике Юпитера. Но вследствие разогрева, связанного с приливным воздействием гиганта Юпитера.

Лунотрясения с глубоко расположенными очагами дают сведения о скоростях сейсмических волн и о внутреннем строении Луны приблизительно до двух третей ее радиуса для видимого полушария. Известно много разных моделей внутреннего строения Луны, но общая картина такова: скорости продольных волн в верхней коре невелики, около 100 м/с и быстро возрастают с глубиной приблизительно до 7 км/с у нижней границы коры на глубине 50-100 км. Затем скорость увеличивается до значений, близких к наблюдаемым в мантии Земли, 8 км/с, и, вероятно, немного уменьшается глубже 500 км. Скорость распространения поперечных волн меньше примерно на 40%.

Глубже 1100 км поперечные волны большей частью затухают, но продольные волны подвергаются не очень сильному воздействию, что,

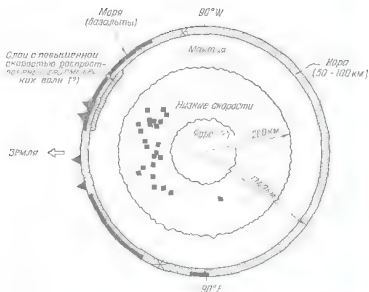


Рис. 116. Очаги туннельных, внутренних и внутренних сейсмических (Ра-сунок Дж. Сингареллы). Треугольники сейсмографы, установленные экспедициями «Аполлонов», квадраты — глубокие зем-летрясения, звездочки — мелкие лунотрясения (?)

вероятно, указывает на частичное расплавление центральных областей. Очень немногие лунотрясения на обратной стороне Луны достаточно сильны для того, чтобы их можно было использовать для изучения ее внутреннего строения.

Изменения геомагнитного поля свидетельствуют о циркуляции вещества в жидком ядре или в оболочке Земли. Луна не обладает общим магнитным полем, но некоторые области размерами в несколько сотен километров намагничены, однако их напряженность лишь слегка превышает миллиполюсю долю напряженности среднего геомагнитного поля. Отсутствие общего магнитного поля, характер взаимодействия со солнечного ветра с Луной, общее распределение температур в недрах (только известно) протяженная застывшая внешняя оболочка до глубины около 1100 км, данные о плотности коры и гравиметрические измерения в совокупности указывают на то, что если у Луны и есть ядра, вероятно в основном железное, то его размеры очень малы, возможно, его радиус менее 300 или 400 км. Температура в центре может достигать около 1600 °C.

Кульминацией программы космических исследований Луны, была доставка на Землю образцов туннельного грунта и пыли и их анализ, выполненный чрезвычайно тонкими методами. Шесть килограммов кос-

мических кораблей «Аполлон» и советские автоматические станции «Луна-16», «Луна-20» и «Луна-24» доставили на Землю вещество из девяти районов Луны. Результаты этих замечательных исследований можно грубо разделить на три группы: а) химический состав и структура, т.е. химия и «геология» Луны; б) изотопы и определение возраста, т.е. хронология и эволюция Луны; в) внедрение частиц солнечного ветра в лунные породы, воздействие микрометеоритной бомбардировки, магнетизм и специальные исследования окрестностей Луны и ее истории. В настоящей книге мы даже не пытаемся обобщить результаты всех опубликованных научных статей, посвященных исследованиям Луны, общий объем которых составляет тридцать тысяч страниц. В этой главе несколько абзацев посвящено хронологии и результатам изучения химического состава, а строение и эволюция будут в основном рассмотрены в гл. 14 и 15.

Несколько радиоактивных изотопов, чаще всего используемых для определения возраста пород, перечислены в табл. 2, указаны также их атомные массы, самые интересные или наиболее устойчивые изотопы, возникающие при распаде, и периоды полураспада. Промежуточные короткоживущие радиоактивные изотопы опущены. Возраст может определяться несколькими методами. Если в результате радиоактивного распада образуется газ, такой, как гелий, то, определив содержание родительских элементов, скажем урана и тория, можно найти возраст породы с тех пор, как они стали достаточно холодными и твердыми, чтобы удержать гелий. Рубидий-стронциевый метод трудно описать в нескольких словах, можно лишь заметить, что он основан на исключительно точных измерениях нескольких образцов, причем в этом случае возраст отсчитывается от момента образования породы, а не от момента ее затвердевания. С помощью различных изотопов свинца из многих образцов тела можно определить возраст всего тела. Для Земли и метеоритов изотопы свинца дают возраст 4,6 млрд. лет.

Датировка образцов лунных пород, доставленных разными космическими аппаратами, обеспечивает калибровку других менее прямых ме-

Таблица 2 Некоторые радиоактивные изотопы

Изотоп	Продукты распада	Период полураспада, млн лет
Уран-238	Свинец-206 и гелий-4	4510
Уран-235	Свинец-207 и гелий-4	713
Торий-232	Свинец-208 и гелий-4	13 900
Иод-129	Ксенон-129	17
Рубидий-87	Стронций-87	47 000
Калий-40	Аргон-40 (11%)	1300
Алюминий-26	Магний-26	0,74

годов датировки, таких, например, как подсчет ударных кратеров. Эти методы очень полезны для определения возраста районов Луны по снимкам, в частности для больших кратеров и лавовых потоков. Для датировки мелких объектов определенным интерес представляют методы, использующие микрометеоритные кратеры и следы солнечных вспышек. Солнечные ионы высокой энергии повреждают структуру кристаллических решеток в приповерхностном слое. Чем продолжительнее облучение, тем больше дефектов в решетке. Это обеспечивает еще один метод хронологии пород.

Большинство ученых считают, что Луна, Земля и метеориты ровесники с точностью около 100 млн. лет, или около 2 %. Лунная хронология также стала разделом точной науки с точностью измерений 2 %. К сожалению, время аккумуляции было меньше 100 млн. лет и очень мало известно о том, где и как собралась вместе эта большая масса вещества. Достоверным можно считать лишь то, что самые внешние слои толщиной несколько сотен километров были расплавлены. Легкие более тугоплавкие вещества поднимались вверх, образуя тонкую кору. В результате возникли материки, образованные минералами менее распространенными на Земле, *анортозитами*, богатыми легкими элементами кальцием и алюминием в соединениях с кремнием и кислородом.

Интенсивность процесса аккумуляции при бомбардировке массивными телами ослабевала по мере развития коры, эти тела пробивали кору и образовывали большие кратеры, из которых разбрызгивалось вещество, к настоящему времени от этих кратеров не осталось и следа. Такая мощная бомбардировка продолжалась примерно 600 млн. лет, так что очень немногие современные лунные образования имеют возраст 4,0–4,2 млрд. лет. Восточные моря, такие, как Море Кризисов, Море Спокойствия, Море Изобилия и Море Ясности, старше, чем Море Дождей, Океан Бурь и Море Облаков, все они представляют собой большие шрамы, оставленные поздней бомбардировкой на ее спаде. Примерно 3,3 млрд. лет назад частота соударений, приводящих к образованию кратеров, упала примерно до ее современного значения.

Радиоактивность, гораздо более интенсивная в те времена, чем теперь, была достаточна для частичного расплавления недр Луны, даже если 4,6 млрд. лет назад Луна была относительно холодной и твердой. Энергия, выделяющаяся при радиоактивном распаде, поддерживала и тем увеличивала расплавленный слой под тонкой корой до тех пор, пока уровень радиоактивности не начал уменьшаться. Тогда-то и началось утопление коры вследствие остывания. Поэтому более тяжелые базальтовые лавы, содержащие больше железа и магния, чем материковая кора, стекали вниз и медленно заполняли морские бассейны. Такое заполнение происходит эпизодически, продолжаясь до 4,0–3,4 млрд. лет назад, времени образования старых восточных морей, и, вероятно, полностью прекратилось 3,0–3,2 млрд. лет назад.

Часть большого камня, доставленного на Землю экипажем «Аполлона-17», имеет возраст 4,36 млрд. лет, но он в основном сформировался около 4,07 млрд. лет назад там, где был подобран на краю Моря Ясно-

сти. В среднем же породы там имеют возраст 3,90-3,98 млрд лет. Самые молодые базальты из западной части Океана Бурь, доставленные на Землю экипажем «Аполлона-12», имеют возраст около 3,2 млрд лет.

Примерно 4,2-4,0 млрд лет назад внешняя кора Луны охладилась достаточно, чтобы выдержать большие неровности поверхности, появившиеся из-за возникновения морей. Область жидких лавовых слоев отодвинулась на глубину до 200-300 км после того как произошло разделение минералов по плотности и температуре. В более поздних лавовых потоках этот эффект проявляется в плотных базальтах. После заполнения морских бассейнов породы внешней мантии выдерживали тяжелые масконы и в дальнейшем не происходило поднятий соседних горных районов, из-под которых вытекала тяжелая лава. Таким образом, свидетельства недостаточного изостатического выравнивания навечно остались на Луне. Борозды по краям морей свидетельствуют о некотором частичном опускании морских бассейнов, но значительно меньшем, чем при полной изостазии.

Растрескивание лунной поверхности (например, рассмотренные выше радиальные трещины в Море Дождей) указывает на разогревание Луны после ее первоначального формирования. Очевидно, во внешней коре Луны существовали значительные напряжения, когда произошло катастрофическое событие, в результате которого возникло Море Дождей. В общем, остывающая Луна должна была сжиматься подобно сушеной сливе. Этот эффект особенно хорошо заметен на изображениях поверхности Меркурия. Итак, можно сделать вывод, что Луна образовалась не в виде расплавленного шара.

В течение последних примерно 3 млрд лет внешний вид Луны оставался по существу неизменным, лишь иногда появлялись новые кратеры, в частности лучевые. Несомненно, существовали и более древние лучевые кратеры, но их лучи со временем исчезали. Считают, что кратер Коперник образовался около 0,8 млрд лет назад, а кратер Тихо всего лишь 0,11 млрд лет назад, т.е. всего 110 млн лет назад.

Механизм действия приливообразующих сил и приведенное в гл. 7 указание на увеличение продолжительности земных суток свидетельствуют о формировании Луны на гораздо более близком расстоянии от Земли, чем современное. Согласно теории Джорджа Дарвина (1845-1912), сына великого естествоиспытателя, Луна когда-то была в контакте с Землей, причем период вращения обоих тел составлял около 4 ч, а впоследствии они разделились из-за приливного трения. Целиком теорию Дарвина принять нельзя, поскольку вязкость в такой системе Земля-Луна воспрепятствовала бы разделению. Однако отсутствуют четкие указания того, на каком расстоянии от Земли сформировалась Луна на самом деле. Вероятно, она образовалась на расстоянии, значительно меньшем половины современного, а возможно, и совсем близко к Земле. Ученые надеялись, что следы древних приливов могли сохраниться где-то на Луне, но во времена, когда она находилась близко к Земле, она еще не была достаточно твердой для этого.

Поскольку влияние приливообразующих сил меняется обратно пропорционально кубу расстояния, скорость удаления Луны от Земли на начальных стадиях была много больше, чем теперь. В самом деле, возможно, когда-то приливные эффекты на Земле были гораздо больше наблюдаемых в настоящее время. Койпер даже предполагает, что эти приливы были так высоки порядка километра или двух, что оказывали заметное влияние на топографию дна океанов, если допустить, что вода на Земле была уже на ранних стадиях ее эволюции.

В гл. 15 мы более подробно рассмотрим возможные механизмы образования и эволюции Луны. Прямые исследования Луны постоянно приносят ответы на старые вопросы и поднимают много новых. Лунные экспедиции позволили раскрыть некоторые тайны богины ночи. Ее древняя поверхность несет на себе следы событий, гораздо более древних, чем следы, сохранившиеся на Земле, а ее история уходит в глубь веков, к тем временам, когда Земля была молодой.

10

Плутон, Меркурий и Венера

Плутон

Самая далекая из уже открытых планет оказалась карликом, затесавшимся в компанию гигантов. Плутон, вероятно, меньше Луны; согласно фотометрическим наблюдениям Дж.-С. Неффа, У. Леина и Дж. Фикса, период его вращения составляет 6,39 дня, изменения блеска достигают 25%.

Значение массы Плутона, вычислявшееся на основании закона всемирного тяготения, с годами уточнялось и оказывалось все меньше. Более точные и непрерывные ряды наблюдений Урана и Нептуна поставили под сомнение существование каких-либо возмущений в движении этих планет со стороны Плутона (см. гл. 3). Чем дольше наблюдались эти планеты, тем меньше становилось влияние малых систематических ошибок первых наблюдений Урана и Нептуна. Следовательно, существование Плутона было предсказано совершенно случайно. Вычисленный Койпером видимый угловой диаметр Плутона равен $0,2-0,3''$ — немного выше разрешающей силы его метода, этому значению соответствует диаметр около 6000 км, т.е. в 1,6 раза больше лунного. Я. Холлпдей из Канады и другие наблюдатели установили сходный верхний предел диаметра исходя из того, что не удалось наблюдать покрытие Плутоном звезды при прохождении на угловом расстоянии $0,125''$ от нее.

Изображения Плутона имеют вытянутую форму. На этом основании Дж. Кристи предположил, что у Плутона есть спутник, предварительно названный Хароном. Наличие спутника позволяет сделать более уверенные оценки массы и диаметра планеты. Период обращения спутника 6,39 дня (равный периоду вращения планеты) и оценка его среднего расстояния 20 000 км ($0,7''$ на среднем расстоянии Плутона от Солнца) дают оценку массы Плутона 0,21 массы Луны. Поэтому если принять, что плотность планеты $3,34 \text{ г/см}^3$, где равна плотности Луны, то диаметр Плутона составляет 0,6 диаметра Луны, или 2100 км. Можно принять это значение в качестве нижнего предела, так как оно соответствует альбедо, равному 1,0, где Плутон считается идеальным отража-

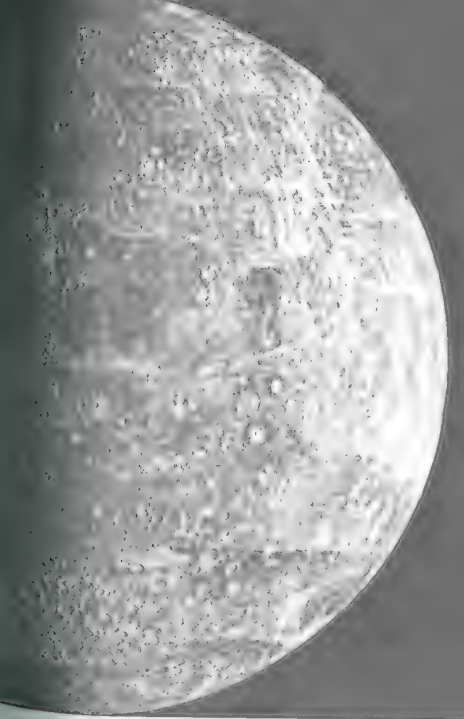
телем. Если же Плутон представляет собой скопление кометного вещества, т. е. смеси льда и пыли, то его плотность может лежать в пределах 1,0–1,8 г см³, а диаметр в пределах от 3200 до 2600 км при альбедо от 0,4 до 0,6 соответственно. Поляризационные наблюдения Л. Келси и Дж. Фикса указывают, что альбедо меньше 0,25, что подтверждает предположение о низкой плотности Плутона. С другой стороны, Д. Крюйкшенк и его сотрудники нашли в спектре Плутона инфракрасные полосы, указывающие, что на его поверхности есть замерзший метан (CH₄). Предсказывается, что температура Плутона около – 228 °С, а при такой температуре метан должен был полностью вымерзнуть. Этим-то, возможно, и объясняется довольно высокое альбедо планеты. Этот результат справедлив, если действительно существует Харон и именно на такой орбите, а плотность Плутона составляет от 1,0 до 1,8 г см³ при диаметре около 3000 км, т. е. меньше лунного. Несомненно, Плутон это бесплодный, холодный и неостепримый маленький мир.

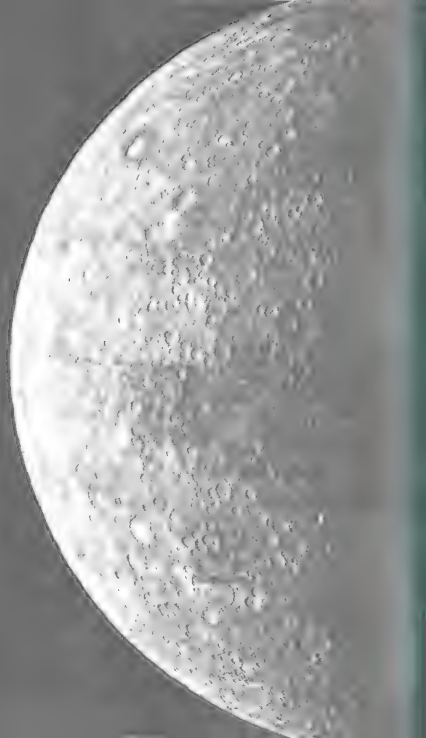
Если Харон по своим физическим свойствам подобен Плутону, и его блеск, как наблюдалось, в шесть раз слабее, то его диаметр должен составлять примерно 2,5 диаметра Плутона, а масса около 1/15 массы Плутона. Он, по-видимому, движется по сильно наклоненной орбите с периодом обращения, равным периоду вращения планеты. Если его орбита совпадает с экваториальной плоскостью Плутона, то Харон должен висеть над одной и той же точкой экватора своей планеты, это была бы уникальная, но устойчивая, конфигурация в Солнечной системе.

Высказывалось предположение, что Плутон вовсе не самостоятельная планета, а потерянный спутник Нептуна. Трудно что-либо сказать по этому поводу, пока не будут получены новые сведения о механизме образования спутников планет. Во всяком случае нет причин для беспокойства, что Плутон может быть разрушен при столкновении с Нептуном, хотя орбиты их и пересекаются. Э. Эпик, С. Коэн и Э. Хаббард показали, что Нептун и Плутон находятся в гравитационном резонансе с периодом, близким к 20 000 лет, и поэтому никогда не столкнутся. В таком случае вряд ли Плутон был когда-нибудь спутником Нептуна. Плутон может быть «родственником» уникального объекта, Хирона, который движется между орбитами Сатурна и Урана. Диаметр Хирона, вероятно, около 200 км; возможно, это комета или астероид поистине загадочный объект. На протяжении десятков тысяч лет его орбита неустойчива, поэтому отсутствуют какие-либо соображения о его прошлом и будущем. Несомненно, во внешней части Солнечной системы существуют другие такие малые тела, бродяги, пережившие все бури и штормы, бушевавшие в Солнечной системе в течение 4,6 млрд. лет.

Рис. 117

Мозаика снимков Меркурия, сделанных Маринер-10. Экватор проходит в середине снимка, на левом краю до 10° (внизу левее располагается котловина Каторик). Фото разрешення НАСА США





Меркурий

Меркурий - четвертая по яркости планета, в максимуме блеска он сияет почти как Сириус и уступает только Венере, Марсу и Юпитеру. Тем не менее Меркурий очень трудный для наблюдений объект из-за близости к Солнцу, наибольшая элонгация (видимое угловое расстояние от Солнца, см. приложение 2) составляет $28'$. В самом благоприятном положении его фаза соответствует четвертям Луны, в полной фазе во время *верхнего соединения* Меркурий находится за Солнцем почти на одной прямой с ним. После захода Солнца или перед его восходом Меркурий виден всегда низко над горизонтом и доступен ночным наблюдениям очень короткое время. Кроме того, условия видимости ухудшаются вследствие турбулентности земной атмосферы, особенно сильно проявляющейся на малых высотах. Поэтому Меркурий чаще всего *наблюдается* днем, а рассеянный солнечный свет, насколько возможно, исключается подходящими экранами. В 1974 г. с пролетной траектории космический аппарат «Маринер-10» передал на Землю качественные изображения почти половины поверхности планеты, по существу первую «надежную» информацию о поверхности Меркурия (рис. 3, 117, 118).

Наблюдатели, изучавшие Меркурий визуально, давно пришли к выводу, что он всегда обращен к Солнцу одной и той же стороной и, следовательно, период вращения вокруг оси и период обращения вокруг Солнца совпадают и равны 88 сут. Радионаблюдения с большим 300-метровым радиотелескопом в Аресибо (Пуэрто-Рико) в 1965 г. рассекли эту долго державшуюся иллюзию. С помощью радиопимпульса, излученного радиолокатором и рассеянного шероховатой сферой, подобной Меркурию, можно выделить кольцевую зону (рис. 119) на поверхности по времени запаздывания принятых импульсов относительно переданных (ошибка 10^{-6} с соответствует 150 м). Диаметр планеты или спутника можно измерить очень точно по длительности отраженного импульса. Кроме того, частота или длина волны отраженного сигнала будет иной, чем частота посланного сигнала, из-за относительного движения мишени и источника, т. е. вследствие эффекта Доплера. Физико, описанного на с. 250. Так, сигнал, отраженный от приближающейся к нам стороны вращающейся планеты, приходит на более высокой частоте, чем от удаляющейся стороны. Можно также выделить полосу частот для измерений отражения от полосы, параллельной оси вращения, на видимом планетном диске. Путем выбора как времени запаздывания, так и принимаемой частоты можно измерить отражение от двух областей (зачерченных на рис. 119) пересечения кольцевой зоны и полосы

Рис. 118.

Мозаика снимков Меркурия, переданных «Маринером-10». Эта информация перекрывает (рис. 117) тева, однако о том, что так грубо отождествлять из-за кривизны, поверхность. Эти два изображения совершенно, около половины поверхности планеты. (С любезного разрешения НАСА СШСА)

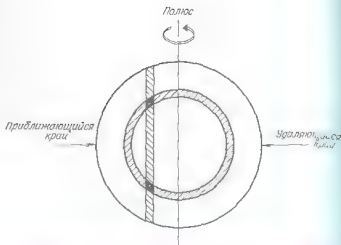


Рис. 119

Схема, иллюстрирующая эффект Доплера. Если на планету направить радиоволны, более широкие, чем диаметр планеты, то в процессе вращения планеты по времени запаздывания кольцевую зону на диске и с доплеровскому смещению частоты узкую полосу, параллельную оси вращения планеты.

Если антенна достаточно велика по сравнению с длиной волны импульса, то можно разделить две зачерненные области. С этой целью можно также использовать интерферометр, состоящий из двух приемных систем. Этот метод позволил построить радиолокационные карты Луны, которые конкурируют с лучшими ее фотографиями, полученными с поверхности Земли.

Радиолокационные измерения доплеровских смещений показали, что Меркурий вращается в прямом направлении с сидерическим периодом всего 59 земных сут, а не 88 земных сут, как считалось долгое время. Легко видеть, что этот период вращения составляет две трети периода обращения и что угловая скорость обращения в перигелии близка к средней угловой скорости вращения. Поскольку приливные силы обратно пропорциональны кубу расстояния, гравитационное воздействие Солнца на сплюснутую фигуру Меркурия сильнее всего должно сказываться вблизи перигелия. Именно под влиянием этих сил период вращения мог приобрести значение, равное двум третям периода обращения. Если первоначально Меркурий вращался быстрее и замедлялся вследствие солнечного приливного трения, он мог в конце концов затормозиться по достижении периода 59 земных сут. Наиболее определенные периоды по радиолокационным наблюдениям, по заново пересмотренным данным оптических наблюдений и по данным «Маринера-10» подтверждают точное соответствие периода вращения резонансу 2:3, а именно 58,6457 земного дня.

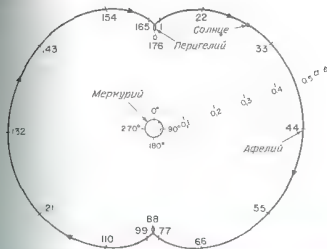


Рис 120.

Продолжительность меркурианских солнечных суток равна 176 земным суткам. Изменение расстояния Солнца в проекции на экваториальную плоскость Меркурия до и после перигелия от произвольной точки

Данные радиолокационных измерений совершенно обескуражили астрономов и оптиков, составивших карты его поверхности в соответствии с периодом вращения 88 земных суток. Однако карты можно было быстро пересмотреть с учетом нового значения периода. Вследствие резонанса 2:3 карты были правильны для половины времени, вина за несоответствие возлагалась на плохое качество изображения. В действительности оптические детали показывают слабую корреляцию с рельефом поверхности.

Вследствие резонанса меркурианские солнечные сутки невероятно длинны, их продолжительность равна 176 земным суткам. За время полного оборота вокруг своей оси по отношению к звездам, т.е. за 59 земных суток, Меркурий пройдет 2/3 своей орбиты; 1 2/3 — 1 1/3 меркурианских солнечных суток, значит его солнечные сутки равны трем сидерическим периодам вращения или двум периодам обращения вокруг Солнца. На рис 120 (вид с полюса орбиты) Меркурий находится неподвижно в центре, нуль-пункт долготы выбран в перигелии в полдень. Кривая показывает видимое движение Солнца на небе Меркурия. В перигелии скорость Солнца несколько увеличивается, так что для воображаемого наблюдателя, находящегося на экваторе, Солнце смещается немного к востоку, прежде чем продолжит свое суточное движение на запад. На долготах, точно равных 90 и 270° (рис. 120), Солнце слегка поднимается над горизонтом на один-два земных суток, затем заходит и снова восходит, чтобы пылать в течение почти мерку-

рианского года; затем оно дважды заходит. В перигелии видимый диаметр Солнца в 1,5 раза больше, чем в афелии, поэтому поверхность Меркурия в перигелии получает в два с лишним раза больше тепла, чем в афелии. Ось вращения по данным радиолокационных и оптических измерений и по наблюдениям «Маринера 10» перпендикулярна плоскости орбиты планеты в пределах точности измерений $2^\circ 3'$.

Атмосфера Меркурия должна быть крайне разреженной из-за низкой силы тяжести на поверхности, а значит невысокой скорости убегания (4,2 км/с), очень высокой температуры на дневной стороне и отсутствия сумеречного продолжения рожек в серповидной фазе. Этот вывод подтверждается данными «Маринера-10», полученными при прямой спектроскопии и по измерениям электронной концентрации во время его радиозатмений. Присутствуют атомы гелия и водорода, но давление на поверхности в подсолнечной точке меньше триллионной доли атмосферного давления на Земле. На холодной ночной стороне давление может быть примерно на порядок выше, но все равно незначительно. Если из недр Меркурия выделяется газ, то скорость выделения вряд ли превышает 1 г/с.

Температуры на поверхности близки к температурам, которые достигались бы на Луне, если бы она двигалась по близкой к Солнцу орбите на среднем расстоянии 0,39 а.е. За очень долгие ночи температура падает до минимального значения около -173°C , а за столь же долгие дни поднимается вблизи подсолнечной точки до максимального значения $+430^\circ\text{C}$. Таким образом, типичные суточные вариации составляют около 600°C (Олово, свинец и даже никель плавятся при $+430^\circ\text{C}$). Поэтому Меркурий с большим правом, чем Плутон, мог бы носить имя бога подземного царства.

Диаметр Меркурия определен по радиолокационным измерениям и наблюдениям радиозатмений «Маринера 10» с очень высокой точностью. Он равен 4878 км, т.е. всего лишь в 1,40 раза больше диаметра Луны. Однако масса Меркурия равна 4,5 лунной массы, значит его плотность составляет $5,43 \pm 1 \text{ г/см}^3$, т.е. почти такая же, как Земли ($5,52 \text{ г/см}^3$). Но степень сжатия Меркурия много меньше чем у Земли, так что по существу Меркурий — самая плотная планета. В нем должно содержаться необычно много железа (плотность $7,8 \text{ г/см}^3$) — наиболее распространенного из тяжелых элементов. На долю железа по массе должно приходиться 60%, или более полной массы.

Описание характерных черт поверхности Меркурия было бы почти полным повторением описания лунной поверхности. Сравнение снимков Меркурия, переданных «Маринером 10», с изображениями Луны свидетельствует об их сильном сходстве. Это сходство распространяется на альбедо, рассеивающие свойства поверхности и даже на теплопроводность и тепловую инерцию. Отсюда можно сделать вывод, что Меркурий покрыт тонким слоем грунта, уплотняющегося с глубиной, как и должно быть на небесном объекте, лишенном атмосферы, вершины slopes которого подтверждены бомбардировке с образованием ударных кратеров в течение трех-четырех млрд. лет.

Различия между Меркурием и Луной, хотя и невелики, но представляют определенный интерес. Горы на Меркурии не так высоки. Меркурианские «морские» районы представляют собой котловины, окруженные равнинами, с меньшей плотностью кратеров, чем на Луне, но различие альбедо морей и материков на Меркурии меньше, чем на Луне. С другой стороны, лучи, исходящие из молодых кратеров и никогда не видимые с Земли, более контрастны, чем на Луне. Повышенное содержание железа в недрах Меркурия может проявляться на поверхности в виде обогащенного железом и титаном вулканического стекла, это уменьшает различие химического состава между областями, сильно покрытыми кратерами (подобными лунным материкам), и морями. Светлые лучи имеют большее сходство с лунными лучами.

Многим большим кратерам на Меркурии даны имена знаменитых писателей, художников и композиторов, например Гомер, Шекспир, Толстой, Роден, Тициан, Ренуар, Бах. Наибольший из них диаметром 625 км носит имя Бетховена.

Котловина Калорис (Море Зноя) (рис. 121) является двойником лунного Моря Дождей. Ее диаметр около 1300 км, и она представляет собой в основном гладкую равнину, испещренную значительным числом трещин и гряд. На краю беспорядочно разбросаны горы высотой до 2 км. Радиальные долины и гряды простираются за пределы котловины Калорис еще на 1300 км, так же как и вокруг Моря Дождей. Признаки основных выбросов распространяются гораздо дальше. Удар при падении тела, приведший к образованию котловины Калорис, был таким сильным, что оставил характерный след на поверхности в диаметрально противоположной точке (рис. 122). Вероятно, здесь сфокусировалась сейсмическая ударная волна и создала невысокие холмы и узкие долины. Фокусировка кратерных выбросов в антиподной области хотя и возможна, но из физических соображений кажется менее вероятной.

По-видимому, событие, связанное с образованием котловины Калорис, вызвало и другие глобальные явления. Дж Гест и Д Гоулт пришли к заключению, что все молодые четко очерченные кратеры диаметром менее 30 км образовались позднее. Не ясно, были ли более старые небольшие кратеры разрушены во время этого события или предшествующих событий и процессов. Из-за отсутствия хронологии для Меркурия можно только гадать, было ли образование котловины Калорис связано по времени с мощной метеоритной бомбардировкой, приведшей к образованию морей на Луне. Вполне возможно, что во внутренней части Солнечной системы существовало большое астероидоподобное тело, разрушенное при столкновениях. Это и обеспечило образование многих крупных обломков, бомбардировавших Луну и внутренние планеты. Некоторые планетологи находят эту идею привлекательной.

Менее выраженный рельеф на Меркурии по сравнению с Луной, вероятно, объясняется большей силой тяжести на планете (в 2,3 раза), а также тем обстоятельством, что основной период образования кратеров пришелся на время, когда Меркурий был более пластичным. Во всяком случае меркурианские кратеры отличаются от лунных в том от-



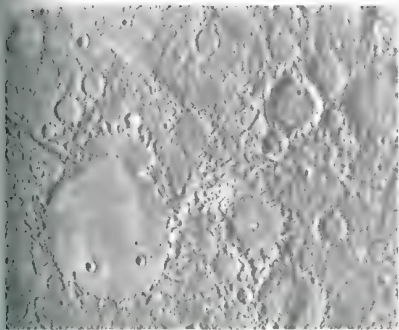


Рис. 122. Кратер Петручка диаметром 60 км (поперек 27 и почти 40). Справа край бассейна диаметрально протянутой котловины Каторис. Кратер и бассейн видны на рис. 118 немного правее и ниже центра. (С любезного разрешения НАСА США.)

ношении, что вторичные кратеры расположены ближе к центральному кратеру, но диапазон их диаметров меньше. Чаше чем на Луне наблюдается геррасная структура внутреннего склона и центральная горка. Валы больших кратеров относительно низки. Все эти явления можно приписать различию в силе тяжести. На Меркурии отсутствуют признаки продолжающегося горообразования или тектоники плит, подобные наблюдаемым на Земле.

Головная ударная волна при натекании плазмы солнечного ветра на планету образуется, вероятно, на расстоянии одного радиуса от поверхности планеты. Таким образом, магнитное поле Меркурия слабое, его напряженность, по-видимому, меньше 0,01 геомагнитного поля. Сильного магнитного поля не приходится ожидать из-за медленного вращения, даже если Меркурий обладает значительным жидким ядром.

Рис. 121. Мозаика снимков котловины Каторис, переданных «Маринером 10» (с левой частью рис. 117) (С любезного разрешения НАСА США.)

Орбита Меркурия напоминает орбиту Плутона. Она сильно наклонена к плоскости эклиптики (на угол $7,0^\circ$) и имеет большой эксцентриситет, равный 0,21. В перигелии орбитальная скорость достигает 58 км/с. Как указывалось выше, благодаря такому быстрому движению и большому эксцентриситету Меркурий обесценивает эмпирическую проверку одного из следствий общей теории относительности Эйнштейна. За столетие его перигелий смещается на $43''$, т.е. сильнее, чем под влиянием возмущений со стороны планет. Наблюдаемая скорость совпадает в пределах точности измерений с значением, предсказываемым теорией относительности. Таким образом, Меркурий внес важный вклад в современную науку.

Венера

Венеру называют вечерней и утренней звездой, древние греки называли ее Геспером и Фосфором. Это самый яркий объект на небе после Солнца и Луны. Она часто видна даже днем, а ночью предметы в ее свете могут отбрасывать тени. Всего 144 дня проходит между восточной элонгацией, когда Венера первой появляется на небе в вечерних сумерках, и западной элонгацией, когда она последней исчезает в лучах утренней зари. Вместе с тем Венере требуется 440 сут., чтобы совершив полный оборот вокруг Солнца, снова появиться в вечерние сумерки (см. рис. 4). Разумеется, ее сидерический период обращения вокруг Солнца гораздо короче, всего 224,70 дня. На минимальном расстоянии от Земли, равном 42 млн км, она ближайшая к нам планета в Солнечной системе. Однако в это время оптические наблюдения Венеры трудны, так как она видна очень близко к Солнцу.

Венера и Земля — истинные планеты-сестры, так как почти одинаковы по массе и размерам. Увеличение даже маленького телескопа достаточно, чтобы превратить сверкающую точку в серебристый серп или диск, несколько размытый из-за неустойчивости нашей атмосферы. Когда серп узкий, кажется, что его рожки охватывают более половины диска. Когда Венера лежит почти на одной прямой между Землей и Солнцем, можно видеть слабое светлое кольцо, полностью окружающее диск. Такая сумеречная дуга хорошо видна на рис. 123. Это мощная атмосфера Венеры, преломляя и рассеивая свет, отклоняет солнечные лучи вокруг всего диска.

Но почему не видны облака в атмосфере или детали на ее поверхности? При наилучшем качестве изображения, когда земная атмосфера прозрачна и спокойна, самые опытные наблюдатели могут различить лишь очень смутные намеки на какие-то детали «богатые темные пятна», как назвал их Барнард. Эти слабые пятна, слишком неопределенные, чтобы их можно было зарисовать, непостоянны. Фотографирование в далекой инфракрасной области также не позволило зарегистрировать детали, несмотря на высокую проникающую способность инфракрасного света в тумане. Лишь когда Ф. Росс (1874–1960) выполнил наблюдения в другом крайнем спектральном диапазоне ультра-

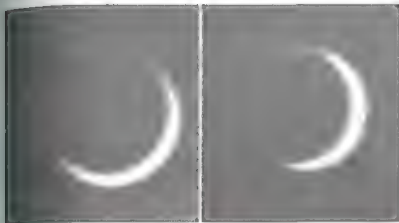


Рис. 123.

Сумеречная дуга вокруг Венеры. Обратите внимание на продолжение рожек серпа полностью окружающее диск на снимке слева, и яркое продолжение вверх на снимке справа (Фото "Слайфера, Ловелловская обсерватория")

фиолетовом, ему удалось сфотографировать детали на Венере. К всеобщему удивлению в ультрафиолетовом свете, бесполезном при изучении земных облаков, были зарегистрированы большие туманные облакоподобные очень неустойчивые образования в атмосфере Венеры. Рис. 124 иллюстрирует сложную структуру венерианских облаков, зарегистрированную в феврале 1974 г. космическим аппаратом «Маринер-10» в ближнем ультрафиолетовом свете. На многих изображениях, полученных из окрестностей Венеры, вид облаков сильно различается в зависимости от времени и положения на планете. Вращение ультрафиолетовых облаков с периодом четыре дня иногда истолковывалось как вращение самой планеты. В настоящее время считают, что это следствие сложной циркуляции в атмосфере.

Замечательные радиолокационные наблюдения Венеры, выполненные на радиотелескопе в Миллстоун-Хилле Массачусеттского технологического института, Голдстоунской установке Калифорнийского технологического института и в Советском Союзе, впервые прояснили ситуацию. На с. 169 и рис. 119 мы описали радиолокационные методы определения характеристик поверхности, размеров и скорости вращения планет. Полученные для Венеры результаты сначала показались невероятными. Направление вращения оказалось *обратным*, а сидерический период составляет $243,0 \pm 0,1$ земного дня, наклон экватора к плоскости орбиты равен 177° . При значении периода 243,16 дня утроенный сидерический период вращения Венеры равен удвоенному периоду обращения Земли вокруг Солнца. Возможно, такой резонанс вызван приливным воздействием Земли на несимметричную фигуру Венеры. В любом слу-

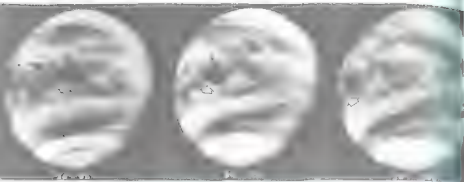


Рис. 124

Изображения венерианских облаков в ультрафиолетовых лучах, переданные «Маринером-10». По наблюдениям в течение 14 часов сделан вывод, что период вращения меняющегося облачного покрова равен 4 суткам (С. Лобезного разрешения М. Б. Стона и НАСА США)

час медленное обратное вращение Венеры твердо установлено и впрямь теории эволюции планет должны объяснять эту аномалию в планетных движениях. Венерианские солнечные сутки равны 117 земным суткам.

По радиолокационным данным поверхность Венеры отражает вдвое сильнее, чем поверхности Луны и Меркурия, ее отражательная способность составляет 12% от полного отражения при осреднении в широком диапазоне радиочастот. Тем не менее ее поверхность более гладкая, чем у Луны и Меркурия, местами она очень гладкая, хотя общий закон рассеяния (кривая задержки) подобен закону для Луны.

В 1980 г. космический аппарат «Пионер-Венера» с радиолокатором на борту был выведен на орбиту вокруг Венеры и позволил заглянуть сквозь ее облачный покров, сделав первый реальный обзор поверхности нашей космической сестры. На рис. 125 приведена радиолокационная карта, охватывающая около 80% поверхности Венеры, а на рис. 126-128 наиболее заметные особенности, выявленные на основе радиолокационных наблюдений и воссозданные воображением художника. Горные области подобны земным континентам. Низменности, соответствующие океанским бассейнам на Земле, занимают только шестую часть поверхности планеты против двух третей на Земле. Область Бета (рис. 126), по-видимому, представляет собой два громадных вулкана шигообразной формы типа вулканов Гавайских островов. Венерианские вулканы так же, как их земные двойники, поднимаются на 4000 м, но занимают несравненно большую площадь.

Два «континента» Венеры, земля Афродиты и земля Иштар (рис. 127) сравнимы по площади с континентальной частью США. Большая часть поверхности планеты представляет собой холмистую равнину с некоторым числом значительных кратероподобных образова-

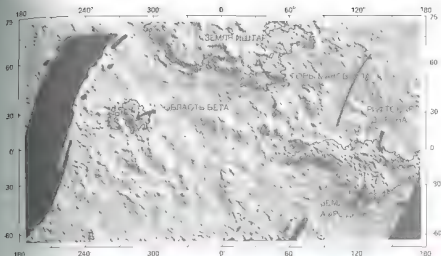


Рис 125

Радиолокационная карта поверхности Венеры, построенная по данным космического аппарата «Пионер-Венера». В использованной картографической проекции Меркатора с удалением от экватора площади увеличиваются, но очертания особенностей рельефа сохраняются. Для черных областей рельефа отсутствуют. На карте детали преувеличены и могут быть искажены. Международным астрономическим союзом (С любезного разрешения НАСА США.)

ний, возможно, вулканов, гораздо меньших размеров, чем области Бета-Земля Иштар, хотя и несколько меньшие земли Афродиты выделяется горами Максвелла — массивом, который возвышается над средним уровнем почти на 11 км, т. е. более чем на 2 км превосходит высочайшую вершину Земли Эверест. Эта горная область наиболее пересеченная на Венере хорошо обнаруживается при радиолокации с Земли, несмотря на высокую широту, где только очень сильно пересеченная местность может создавать обратное отражение. Земля Иштар, расположенная западнее гор Максвелла, вдвое больше Тибетского нагорья и лежит на большей высоте. Она, по-видимому, относительно гладкая и, возможно, покрыта недавно изверженной лавой.

Земля Афродиты примечательна двумя протяженными рифтовыми долинами, простирающимися на ее восточном краю на 2200 км (рис. 128). Рифты расноложены ниже среднего уровня венерианской поверхности подобно земным срединно-океаническим рифтам и очень похожи на большую долину Маринера на Марсе. Чрезвычайно сильно пересеченные горные зоны очерчивают северо-восточную и северо-западную границы земли Афродиты. Западная гряда самая высокая и величественно возвышается на 7 км над соседней равниной и почти на 8 км над средним уровнем.

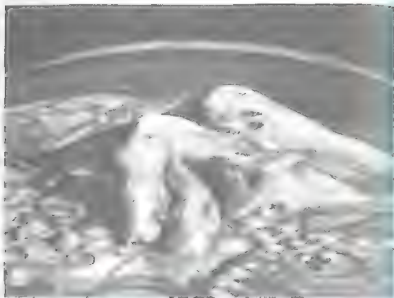


Рис. 126

Вид щитообразных вулканов в области Бета на Венере в изображении художника (С любезного разрешения НАСА (США).
Две советские автоматические межпланетные станции «Венера-9 и 10» совершили посадку в непосредственной близости к востоку от области Бета и определили, что составляющие ее породы относятся к базальтам.

Итак, многие топографические особенности поверхности Венеры аналогичны земным, что указывает на «геологическую» активность планеты. Нужно еще найти признаки современной вулканической активности, если она существует, а также определить плотность метеоритных кратеров, чтобы установить хронологическую шкалу.

Еще более неожиданный сюрприз принесли радиоастрономические наблюдения. Оказывается, Венера очень горячая! Измерения температуры верхней части облаков в инфракрасных лучах показали, что там холодно, около -38°C , как на освещенной Солнцем, так и на ночной стороне. Такую же температуру имеют границы высоких земных облаков. Но результаты радиоизмерений выглядели просто невероятными: на очень коротких волнах 3 мм температура оказалась даже выше, чем по данным измерений в инфракрасном диапазоне. На длинах волн 2 см и более температура достигла чудовищного значения — выше 310°C . Такую температуру измерила советская автоматическая межпланетная станция «Венера-4», вошедшая в атмосферу планеты со скоростью 11 км/с и сбросившая на парашюте спускаемый аппарат с приборами на борту. Впервые измеренное давление в то время также вызвало удивле-

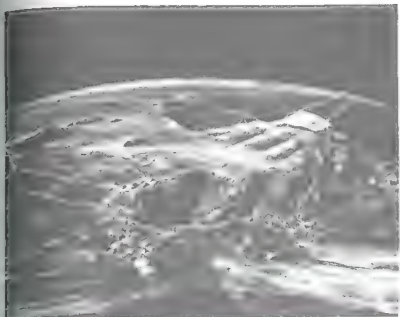


Рис 127 Земля Иштар на Венере в изображении художника. Нанесены также контуры континентальной части США. В северной части проекция искажена (с' повзного разрешения НАСА США)

ние: от 17 до 22 атм. Другие станции серии «Венера», космические аппараты «Маринер», а также запущенный в 1978 г. космический аппарат «Пионер-Венера», от которого отделились зонды, измерили еще более высокие значения (рис 129). Очевидно, вследствие высокого давления первый спускаемый аппарат вышел из строя не достигнув поверхности.

Температура поверхности Венеры равна 467°C с точностью около $\pm 10^{\circ}\text{C}$; она мало меняется ото дня к ночи и очень быстро падает в атмосфере с высотой. Некоторые обычно твердые элементы: кадмий, свинец, олово и цинк на Венере должны быть в расплавленном состоянии, а сера кипела бы, если бы не высокое давление, которое способствует сохранению серы и серной кислоты в жидком состоянии. Для сравнения укажем, что температура в духовке газовой плиты редко превышает 260°C . По земным стандартам давление на Венере просто чудовищно: около 90 атм! Оно соответствует давлению в океане на глубине 900 м, недоступной даже ныряльщикам со специальными дыхательными аппаратами.

Вызывают удивление не только протяженность, но и необычный химический состав атмосферы. Первые свидетельства его необычности

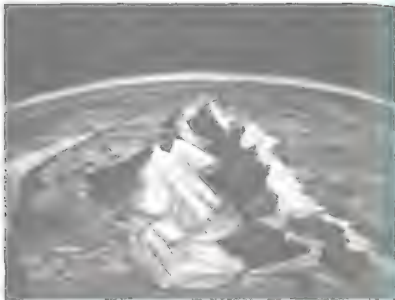


Рис. 128

Рифовая долина на восточном краю земли Африки. На фото сильно преувеличена. Максимальный угол наклона составляет 7°, но для Венеры это большая крутизна. Ширина рифа 780 км, а глубина всего около 2 км. (С любезного разрешения НАСА США.)

были найдены при наземных наблюдениях с помощью спектрографов приборов, разлагающих свет на его основные цвета и фотографирующих всю их последовательность от ультрафиолетовых до инфракрасных лучей. Анализируемый свет сначала проходит через входную щель спектрографа (рис. 130), затем через линзу к призме или дифракционной решетке, которые разлагают свет на составляющие его цвета, образуя спектр. Спектр — это своего рода радуга, только цвета в нем разделяются гораздо лучше. Вторая линза спектрографа служит для фокусировки спектра на фотографическую пластинку или чувствительное регистрирующее устройство. При длительной экспозиции спектрограф способен регистрировать очень слабое излучение, недоступное невооруженному глазу.

Спектрографы, которым в настоящее время доступны инфракрасный и радиодиапазоны спектра, позволяют решить многие проблемы, в том числе одну из важнейших — выявление тех или иных химических соединений в газовых смесях. По излучению, выходящему из свечащегося или поглощающего газа, можно определить свойства газа. Каждый атом или молекула представляют собой осциллятор. Элементарные отрицательные заряды — электроны — обращаются по миниатюрным орбитам во-

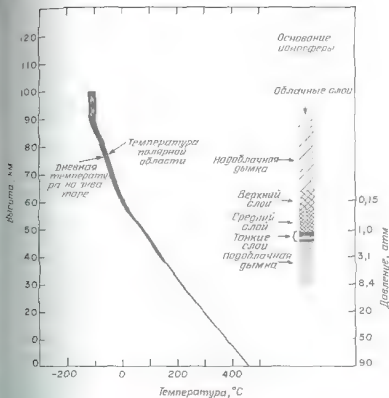


Рис. 129 Температура, давления и высоты, облачных слоев в атмосфере Венеры. (Рисунок Дж. Сингареллы)

круг положительно заряженного ядра, или, иначе говоря, находятся на определенных энергетических уровнях. Два или более атомов в молекуле, кроме того, вращаются или колеблются относительно друг друга, а электроны вращаются по более сложным орбитам.

Всем этим движениям и колебаниям в атомах и молекулах соответствуют вполне определенные дискретные количества энергии. Они крайне малы, но характерны для каждого атома или молекулы. Если атом теряет энергию при переходе электрона на более низкий энергетический уровень, то она излучается в виде фотона (или кванта мельчайшей единицы лучистой энергии) с определенной энергией, воспринимаемой глазом как цвет (если это видимый свет), и определенной длиной волны. Свет, как и радионизлучение, это электромагнитные волны, только длина световых волн гораздо короче, чем радиоволн. Красному цвету соответствует длина волны около 1 600 нм, и 0,6 мкм, длина волны



Рис. 130. Схема спектрографа. Оптическое действие призмы на белый свет

синего-зеленого цвета меньше. Инфракрасное, или тепловое, излучение в несколько раз длиннее, длины волны ультрафиолетового света равны половине этого значения или короче.

Раскаленный газ около поверхности Солнца испускает свет всех цветов радуги, а следовательно, и всех длин волн. Когда такое непрерывное излучение проходит через слой холодного газа, например нашу атмосферу или атмосферу Венеры, атомы и молекулы поглощают из светового пучка излучение точно на тех длинах волн, которые характеризуют частоты их колебаний, и возбуждаются. При анализе света с помощью спектрографа мы измеряем длины волн поглощенных фотонов и таким путем возбуждаем атомы и молекулы на пути пучка излучения. На этих длинах волн в спектре видны темные линии поглощения.

При неоднократных наблюдениях с наземными спектрографами не удалось найти никаких признаков водяного пара на Венере или заметить линии и полосы, которые принадлежат воде. У Адамса (1876-1960) и Г. Данхем на обсерватории Маунт-Вилсон открыли новые инфракрасные полосы поглощения, не известные из лабораторных исследований. Для проверки предположения о принадлежности этих полос обычному углекислому газу Данхем изготовил 18-метровую трубу углекислым газом под давлением 10 атм. Когда искусственный свет был направлен в трубу и отразился назад к тому же самому спектрографу, с которым наблюдались спектры Венеры, в полученном спектре были найдены идентичные полосы поглощения. На рис. 131 сравниваются спектры Венеры и Солнца.

В ходе космических полетов к Венере было подтверждено присутствие в ее атмосфере огромных количеств углекислого газа. Наиболее полные данные были получены с помощью атмосферного зонда «Пионер-Венера» и станций «Венера». В табл. 3 приведен химический состав атмосферы (по объему), определенный газовым хроматографом «Пионера Венеры» и данные измерений на «Венерах-4, 10 и 11-14». Хотя азот не является преобладающей составляющей атмосферы Венеры, в отличие от Земли, тем не менее его полное содержание может быть или больше превышать количество азота в земной атмосфере. Водяной пар, содержание которого в земной атмосфере сильно меняется, может существовать на Венере в количестве, почти сравнимом с земным по аб-

Таблица 3

Химический состав атмосферы Венеры

Газ	Содержание по объему, %		
	«Пионер - Венера» ¹	«Венера-4-10» ²	«Венера-11 14» ³
Углекислый газ CO ₂	96,4	97	96,5
Азот N ₂	3,4	1,8 4,0	3,5 ± 0,5
Вода H ₂ O	От 0,002 до 0,52	От 0,1 до 1,0	0,07 ± 0,03
Водород H ₂	0,03		От 0,0015 до 0,0035
Двуокись серы SO ₂	0,018	≈ 0,1	От 0,0010 до 0,0016
Окись углерода CO	От 0,003 до 0,007		От 0,02 до 0,035
Кислород O ₂	0,007?		От 0,0014 до 0,0022
Аргон Ar	~ 0,0065		От 0,009 до 0,013
Аммиак NH ₃		От 0,01 до 0,17	
Неон Ne	От 0,0005 до ~ 0,0020		От 0,0010 до 0,0015
Гелий He	От 0,0001 до 0,001		
Сероводород H ₂ S			От 0,004 до 0,012

¹ По В. Ояма, Г. Карлу, Ф. Воллеру и Дж. Б. Поллаку² M. Ya. Marov Ann Rev Astron Astrophys, 16, 141, 1978, Surkov A. Proc. Lunar Sci Conf VIII, 1977, p. 2665 При наземной спектроскопии выявлены следы соляной и плавиковой кислот. Атомы гелия и водорода преобладают в очень высоких областях атмосферы, особенно ночью.³ Истомин В. Г., Гречнев К. В., Кочнев В. А. Письма в АЖ, 5, 211, 1979, 8, 391, 1982

Гельман Б. Г., Золотухин В. Г., Ламонов Н. И. и др. Космич. исслед., 17, № 5, 1708, 1979. Мухин Л. М., Гельман Б. Г., Ламонов Н. И. и др. Космич. исслед., 21, 225, 1983. Прим. ред.



Рис. 133 Спектр Венеры (Солнце) и спектр Венеры (Солнце). Видно, что спектр Венеры отличается от спектра Солнца тем, что спектр Венеры имеет более глубокие линии поглощения. Это указывает на то, что в атмосфере Венеры содержится больше углекислого газа, чем в атмосфере Солнца (фотография Г. Деминга, с. 100, о распределении И. Р. Космического Обсерватория).

соответствующему содержанию Кислорода действительно мало, но подсчетам его полное содержание составляет около 3%, или меньше от полного содержания в земной атмосфере. Некоторые интересные результаты касающиеся изотопов аргона, будут рассмотрены в гл. 15, поскольку они относятся к сравнительной эволюции Земли и Венеры.

Высокая температура на поверхности и высокое содержание углекислого газа в атмосфере вполне закономерны. Углекислый газ очень прозрачен для всех видимых лучей, а также для ультрафиолетовых лучей, однако он исключительно сильно поглощает тепловое (далекое инфракрасное) излучение. Отсюда следует, что мощным фактором нагревания поверхности Венеры должен быть парниковый эффект. Значительное количество солнечной энергии может поступать в форме видимого света, тогда излучение от нагретой поверхности будет поглощаться углекислым газом. С помощью такого же процесса регулируется температура земной поверхности. Карл Сэган показал, что небольшое количество водяного пара блокирует «щели» в инфракрасном спектре углекислого газа, через которые тепло могло бы уходить из атмосферы Венеры. Наблюдаемого количества воды для этого достаточно, а следы двуокиси серы блокируют остальные «щели».

На Земле вода действует как катализатор, способствуя образованию соединений углекислого газа с силикатами и связывая таким образом двуокись углерода в карбонатных породах. За геологические времена на Земле образовался слой таких пород толщиной около 200 м. Если бы можно было собрать воедино весь углекислый газ, содержащийся в карбонатных породах, в океанах, в почве и в биосфере, то его полное количество было бы близко к количеству углекислого газа в современной атмосфере Венеры. Таким образом, удивление вызывает не присутствие углекислого газа в атмосфере Венеры, а отсутствие первичной воды.

В земную атмосферу кислород поступает вследствие диссоциации молекул воды под действием ультрафиолетового излучения, причем водород, атомная масса которого мала, уходит в космическое пространство. Таким образом, из-за отсутствия воды на Венере ее атмосфера практически лишена кислорода, что согласуется с наблюдениями.

В течение многих десятилетий химический состав облаков Венеры

оставался тайной. Затем были найдены свидетельства того, что облака состоят в основном из капелек концентрированной серной кислоты! Надоблачная дымка, выше 60 км, и подоблачная дымка, ниже 48 км, состоят из частиц размерами примерно 1 мкм, т.е. равными удвоенной длине волны синие-зеленого излучения (рис. 129). В более плотных облаках между упомянутыми уровнями распределение частиц по размерам много шире, причем максимум лежит между 5 и 10 мкм. Возможно, присутствуют частицы твердой серы. В 1978 г. опустившийся на дневную сторону зонд «Пионера Венеры» поднял при посадке некоторое количество пыли, которая оседала в течение нескольких минут. Какого сорта эта пыль? На Венере наблюдаются молниевые разряды, сравнимые с земными. Возникают ли они во время бурь с серными «дождями»?

Хотя облака Венеры полностью скрывают ее поверхность от нашего взгляда и сквозь них может проникнуть лишь луч радиолокатора, они не такие плотные, как можно было бы предполагать. Чтобы возник парниковый эффект, заметное количество солнечного излучения должно достигать поверхности. По измерениям спускаемых аппаратов советских АМС «Венера» освещенность на поверхности составляет 10%, от освещенности на Земле, т.е. там сумрачно как в пасмурный день. Благодаря этому спускаемым аппаратам «Венеры-9» и «Венеры-10» удалось сделать при естественном освещении удивительные снимки поверхности Венеры (рис. 132). Со спускаемых аппаратов «Венеры-13 и 14» переданы круговые панорамы, в том числе цветные изображения других участков поверхности (рис. 133).

На трех АМС серии «Венера» была измерена также естественная радиоактивность поверхностных пород. Уровень радиоактивности, измеренный «Венерой-9 и 10», сравним с радиоактивностью базальтовых пород, а «Венерой-8» с радиоактивностью гранитов. По измерениям «Венеры-10» плотность пород на глубине нескольких десятков сантиме-

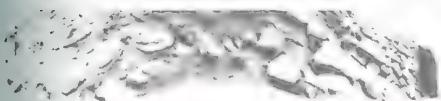
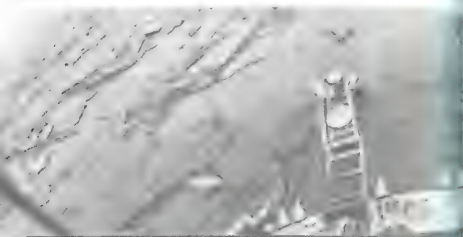


Рис. 132

Панорама поверхности Венеры, переданная советской автоматической межпланетной станцией «Венера-9» 22 октября 1975 г. (после обработки на ЭВМ). Размер камня примерно 50 см. Поле зрения 180°, наклон камеры 50°.



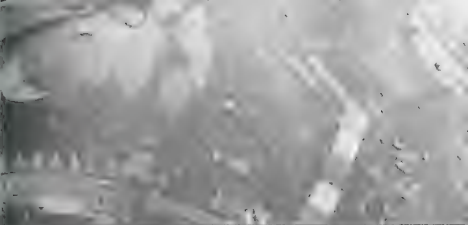
ВЕНЕРА-13 ОБРАБОТКА



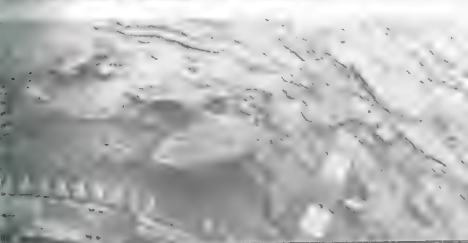
ВЕНЕРА-14 ОБРАБОТКА

Рис. 133.

Панорама поверхности в местах посадки спускаемых аппаратов советских межпланетных станций «Венера 13» и «14». Ландшафты свидетельствуют о тонкой горизонтальной слоистости пород [Каменная осьель на панораме «Венеры-9» (рис. 132) по-видимому, образовалась вследствие такого расчленения при смещении в месте залегания]. Число слоев вблизи аппарата (в пределах 2 м от опорного козла) 5-10, их толщина 1-2 см. Слои различаются по цвету и протяженности, наблюдаются отдельные следы выклинивания (разрушения). Одновременно проведенный анализ элементного состава пород подтверждает выводы относительно их базальтовой природы и позволяет уточнить типы базальтов.



ИПЛИ АН СССР И ЦДКС



ИПЛИ АН СССР И ЦДКС

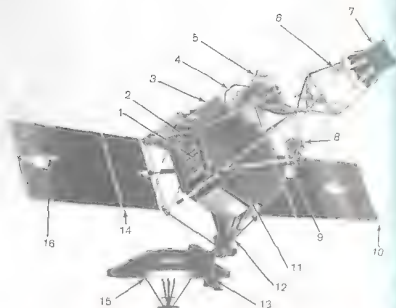


Рис. 134

Космический аппарат «Маринер-2», который пролетел около Венеры 14 декабря 1962 г. (с победного разрешения НАСА США): 1 — жалюзи для регулировки температуры; 2 — детектор солнечной плазмы; 3 — термоэлектрический экран; 4 — радиометр; 5 — опорные рупорные антенны радиометра; 6 — датчик магнетометра; 7 — всенаправленная антенна; 8 — детектор потока энергичных частиц; 9 — кинокамера; 10 — вспомогательная антенна Солнца; 11 — датчик космической пыли; 12 — основной датчик Солнца; 13 — датчик ориентации на Землю; 14 — панели солнечных батарей; 15 — параболическая остроуправляемая антенна; 16 — антенна командной радиосвязи.

тров равно $2,7 \pm 0,1 \text{ г см}^3$, что значительно меньше средней плотности Венеры ($5,25 \text{ г см}^3$). Это значение типично для базальтов.

На рис. 132 и 133 видны следы эрозии и выветривания пород. Не найдено каких-либо признаков переноса вещества ветром, да и вряд ли этого можно ожидать, поскольку вблизи поверхности ветры очень слабы, до высот несколько километров скорость ветра составляет 0,3–1,4 м/с. На высотах от 10 до 50 км ветры усиливаются от 50 до 60 м/с; это значение типично и для гораздо больших высот. Не известно, происходит ли какое-либо химическое выветривание. Возможно, главными причинами разрушения горных пород служат вулканическая и сейсмическая активность.

В 1962 г. вблизи Венеры на расстоянии 34 800 км, проше 1 космический аппарат «Маринер-2» (рис. 134). Среди главных результатов полета отметим следующий: магнитное поле Венеры пренебрежимо мало, в настоящее время найдено, что его напряженность в 10^5 раз меньше напряженности геомагнитного поля. Поэтому гоювная ударная волна солнечного ветра падает на расстоянии всего 1,5 радиуса планеты от ее центра, т.е. в 10 раз ближе, чем от Земли. Магнитосфера практически отсутствует, так что иногда солнечный ветер попадает прямо в ионосферу. Отсутствие у Венеры заметного магнитного поля согласуется с ее медленным вращением. Если даже у Венеры и есть горячее ядро, подобное земному ядру, ее скорость вращения недостаточна, чтобы в нем возникли внутренние движения, способные генерировать магнитное поле.

Описанные до сих пор в нашем обзоре планеты не пригодны для жизни. Плутон слишком холоден, Меркурий одновременно слишком горяч и слишком холоден; обе планеты так же, как и большинство спутников планет, лишены атмосферы. Атмосферы планет-гигантов состоят из вредных или ядовитых газов, и, возможно, эти планеты вообще не имеют твердой поверхности. Венера, хотя и подобна Земле, но на ней очень жарко и к тому же нет кислорода.

11

Марс

Марс был назван в честь бога войны за свой кроваво-красный цвет, который сразу же бросается в глаза и еще более интенсивен при наблюдении в телескоп. К сожалению, это название оказалось весьма символичным, когда на рубеже нашего столетия, именно из-за этой планеты среди астрономов разгорелись настоящие баталии. На одной из сражающихся сторон был Персиваль Ловелл, несший знамя впервые поднятое Скиапарелли, и его немногочисленные сторонники, на другой — значительная часть астрономического мира. Поводом для баталий послужили марсианские «каналы», наблюдавшиеся как Скиапарелли, так и Ловеллом, и отстаивавшееся Ловеллом объяснение этих узких деталей как искусственных сооружений. Скиапарелли использовал итальянское слово *canali*, которое означает пролив, проток, но он вовсе не считал, что каналы искусственные сооружения. Ловелл исходит из собственных длительных наблюдений Марса. Некоторые из его рисунков воспроизведены на рис. 135.

В научном мире разногласия между крупными авторитетами способствуют прогрессу. Обычно каждый из соперников в чем-то прав, а в чем-то ошибается, но пыл дискуссии способствует развитию наблюдений — фундамента науки. Марсианские баталии закончились, их дым рассеялся. Вряд ли можно сказать, что Скиапарелли одержал решительную победу, но Ловелл безусловно проиграл. Тем не менее энтузиазм Ловелла разбудил воображение и послужил стимулом для новых наблюдений.

Теперь мы знаем Марс лучше, чем знали Луну до начала космических исследований. «Маринер 4» передал на Землю изображения Марса, по качеству примерно сравнимые с фотографиями Луны, полученными с Земли, а орбитальные и посадочные аппараты «Викингов-1 и 2» перенесли нас прямо на его поверхность.

Когда Марс находится в наиболее благоприятном для наблюдений положении относительно Земли, его угловые размеры при увеличении в 70 раз сравнимы с угловыми размерами видимого диска Луны. Для работы с таким увеличением можно с успехом использовать небольшие телескопы, крупные инструменты эффективны при наблюдениях с гораз-



Рис. 135 Составленные Ловеллом карты Марса на 1894, 1901, 1903, 1905 и 1907 гг., нанесенные на сферу и сфотографированные, ют сверху (С любезного разрешения Ловелловской обсерватории)

до большим увеличением. Поскольку протяженные образования на Луне видны невооруженным глазом, читатель может спросить, почему же тогда Марс так трудно наблюдать. Трудность опять связана с качеством изображения (табл. 10). При наиболее благоприятных условиях, когда Марс находится на минимальном расстоянии от Земли, глаз изредка может различать контрастные точки, разделенные расстоянием 30-50 км. Разрешение, достигаемое с очень большими телескопами, не намного лучше, чем с телескопами с апертурой 50-80 см (рис. 136). Разрешение на фотографиях обычно не лучше, чем 300 км. Из-за отсутствия теней при наблюдениях с Земли на Марсе нельзя обнаружить даже высокие горы и глубокие каньоны, так как он наиболее удобен для наблюдений, когда находится в противостоянии.

Даже после первых наблюдений с небольшими телескопами при весьма умеренном качестве изображения Марс сразу же выделяется своей неповторимостью. Ловелл писал: «Как только увеличение телескопа позволяет видеть диск Марса, на нем сразу же можно заметить белые пятна, венчающие глобус, усыпанный синие-зелеными пятнами на оранжевом фоне». Это сдержанное описание производит большее впечатление, чем восторженная запись новичка, впервые увидевшего Марс с небольшим телескопом при среднем качестве изобра-

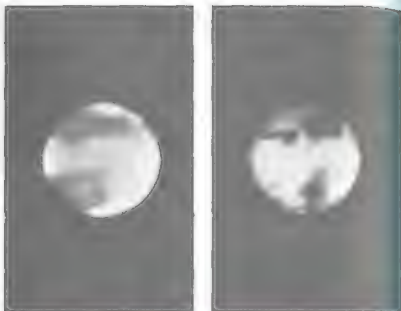


Рис. 136. Фотографии Марса, сделанные на 5-килограммовом рефлекторе обсерватории Лик (слева) и красных (справа) в начале 1909 года (Фотографии с обсерватории Маунт Вилсон и Маунт Паломар)

жения. Но, проводя у телескопа ночь за ночью, наблюдатель приобретает все больше опыта, пока наконец его глаз не станет способен распознавать детали поверхности, которые сначала он совершенно не видел. Такое повышение остроты зрения по мере накопления опыта иногда недооценивается даже квалифицированными наблюдателями, которые не занимаются наблюдениями планет.

Благоприятные условия для наблюдений Марса повторяются через каждые 2 года 50 сут, когда он находится в противостоянии. Его синодический период относительно Земли равен 780 сут, что приблизительно на 50 сут больше, чем 2 года (см. приложения 2 и 3). При различных противостояниях расстояние между Марсом и Землей меняется почти вдвое (от 55,7 млн до 101,2 млн км) вследствие большого эксцентриситета марсианской орбиты. Наиболее благоприятны для наблюдений великие противостояния, когда Марс ближе всего подходит к Земле, т. е. когда противостояние совпадает с прохождением планеты через перигелий. Поскольку каждое следующее противостояние происходит на 50 сут позже предыдущего, благоприятные противостояния будут повторяться через 7 или 8 периодов, т. е. через 15-17 лет. Орбита Марса ориентирована так, что он оказывается в наилучших условиях для на-

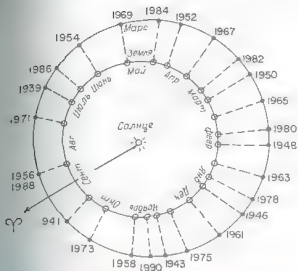


Рис 137

Противостояния Марса относительно Земли в 1939-1990 гг. От последовательные расхождения показаны штриховыми линиями. Месяцы указаны по земному календарю. Марс находится к северу от небесного экватора во время противостояния, происходящих с сентября по март.

блюдений примерно в августе (1956, 1971, 1988 гг.) Положение Марса во время разных противостояний иллюстрирует рис 137.

Экватор Марса, как и Земли, наклонен к плоскости орбиты на угол около 24° , причем направление оси вращения в пространстве остается постоянным. Поэтому во время великих противостояний мы всегда видим одно и то же полушарие. Волею случая лучше наблюдается южная полярная шапка, северная полярная шапка видна с Земли в менее благоприятных противостояниях.

Марс совершает полный оборот вокруг своей оси за $24\text{ ч } 37,4\text{ мин.}$, т.е. марсианские солнечные сутки (от полудня до полудня) почти на 40 мин длиннее земных. Вращение становится заметным менее чем через час наблюдений. На следующую ночь планета представит той же самой стороной, потому что она тем временем почти завершит полный оборот вокруг оси. За время немного больше земного месяца планета совершит полный оборот вокруг оси относительно Земли, т.е. за этот период земной наблюдатель сможет обозреть всю ее поверхность. Наблюдатели, расположенные по всей Земле, могут наблюдать всю поверхность Марса при оптимальной фазе планеты за 24 часа.

Обычно самыми заметными деталями на фотографиях Марса и при визуальных наблюдениях являются его полярные шапки. Сезонные изменения, открытые сэр Уильямом Гершелем, весьма регулярны и да-

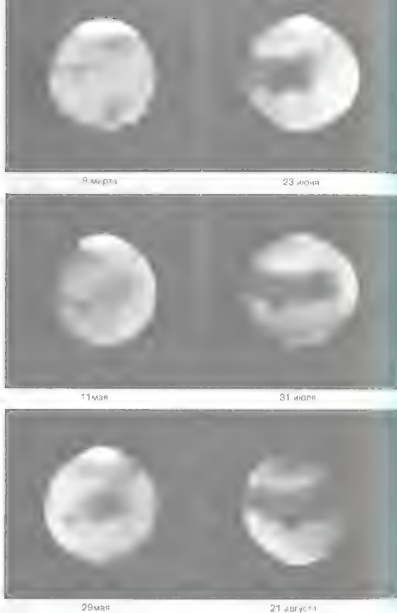


Рис. 28

Сезоны на Марсе. Даны по марсианскому календарю в соответствии с сезонами на Земле. Юг вверх (Фото Э. Слайфера, Ловелловская обсерватория)

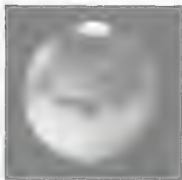


Рис. 139 Горы Митчела. Фотографии Марса в 1909 и 1924 гг. Обособленная область южной полярной шапки появляется около 3 июня по марсианскому календарю (юг вверх). (Фото Э. Слайфера, Ловелловская обсерватория)

же предсказуемы с значительной точностью. Когда на одном из марсианских полушарий на смену осени приходит зима, соответствующая полярная шапка начинает неравномерно расти и достигает 57 широты в северном полушарии и 45 в южном. Дело в том, что в южном полушарии зимой холоднее, но зато летом теплее, чем в северном. С приходом весны (в марсианском марте) полярная шапка начинает уменьшаться и к концу марсианского июля она исчезает на южном полюсе, северная же полярная шапка никогда полностью не исчезает. Фотографии одной и той же стороны планеты, представленные на рис. 138, иллюстрируют сезонные изменения южной полярной шапки. Даты указаны по марсианскому календарю для удобства сопоставления с земными сезонами; напомним, что марсианский год равен 687 суткам, т. е. почти двум земным годам. Тщательное сопоставление ряда фотографий позволяет выявить общее потемнение вокруг белой области по мере уменьшения полярной шапки в марте и в мае, усиление темных областей с удалением от полюса в июне, июле и их ослабление в августе. Такая последовательность событий повторяется каждый марсианский год с местными и систематическими вариациями.

Из года в год в один и тот же сезон вновь появляются даже мелкие детали поверхностных образований. На обеих фотографиях (рис. 139) видна выходящая из полярной шапки обособленная область. Первая фотография была получена в 1909 г., вторая — в 1924 г., обе 3 июня по марсианскому календарю. Эта область носит название гор Митчела. Изображения, переданные орбитальным аппаратом «Викинга-2», дали ответ на давний вопрос: горы Митчела оказались высоким «полюстровом» (рис. 140), а не «защиточ». Большая котловина ударного происхождения расположена под ними, почти свободная от льда.

Повторяющийся характер изменений в полярных шапках прямо



Рис. 140.

Мезоклимат южной полярной шапки по снимкам орбитального модуля «Викинга-2» в 1977 г. Горы Митчела видны как длинный «палец» вверх при С. (с южного экватора НАСА США)

указывает на то, что эти белые области состоят из обычного водяного снега, который тает при возрастании температуры. Но не исключено, что они состоят из замерзшего углекислого газа, или «сухого льда». Как мы увидим ниже, оба предположения справедливы.

Марсианской осенью, когда начинается формироваться полярная шапка, можно наблюдать неустойчивые пучковато-белые облака. Первые

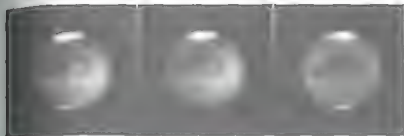


Рис 141

Облака в районе полюсов Марса. Слева — вид с Земли, в центре — вид с Марса, справа — вид с Земли. Облако исчезло, справа через 6 суток появилось новое облако Юг вверху. (Фото Э. Слайфера, Ловелловская обсерватория.)

две фотографии рис 141 были получены в последовательные ночи в 1939 г. Э. Слайфером (1883—1964). Белое облако вблизи северного полюса (левый снимок, внизу) исчезло к следующей ночи (средний снимок). Через шесть ночей появилось другое облако (правый снимок). Такие облака наблюдаются во время роста полярной шапки, поэтому необходимо применять специальные методы наблюдений, чтобы не спутать их с инеем или снегом, лежащими на грунте. Такие облака неоднократно наблюдались с космических аппаратов.

Инфракрасные лучи свободно проникают сквозь легкий туман и пыль в земной атмосфере, тогда как синие и фиолетовые лучи поглощаются. На рис 142 приведены фотографии, сделанные У. Райтом (1871—1959) на Ликской обсерватории в фиолетовых и инфракрасных лучах. Слева для сравнения показана долина Сан-Жозе. Лучи пыли, поднимаясь в «воздух», могут скрыть поверхность Марса от внешнего наблюдателя и от телекамер космического аппарата. Программа полета «Маринера-9» в ноябре 1971 г. чуть не сорвалась из-за сильной, охватившей всю планету пылевой бури во время его приближения. К счастью, в нужное время буря утихла. Такие пылевые бури наиболее часты, когда Марс проходит через перигелий.

С Земли довольно успешно наблюдались полярные шапки Марса и их изменения, пылевые бури и облака, измерялась температура, определялся цвет. Но до космической эры и развивавшихся параллельно радиолокационных исследований о топографии Марса мы не имели ни малейшего представления. На рис 143 затененные области и названия соответствуют наиболее представительной карте, составленной до полетов «Маринеров». Для характерных образований даны их латинские названия: *mare* — море, *sinus* — залив или бухта, *lacus* — озеро, *lucus* — роща или лес, *fretum* — узкий пролив или канал и *palus* — болото. Сколько надежды возбудили в этих названиях! Наименования самых ярких областей не связаны с какими-либо топографическими образованиями, например Элизий, Эллада. Определения цвета различных областей разными наблюдателями довольно хорошо согласуются, но большинство современных

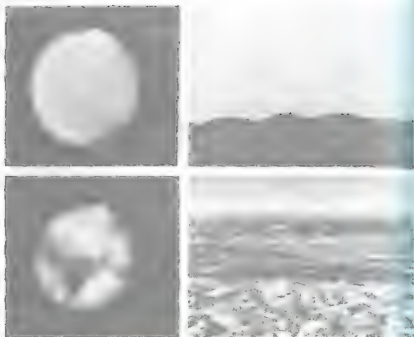


Рис. 142 Снимки Марса и долины Сан Жозе, полученные на Ликской обсерватории, сверху в фиолетовых лучах внизу в инфракрасных лучах Юг сверху (Фото У. Райта, Ликская обсерватория.)

исследователей считают, что желтоватый оттенок всего лишь затененная иллюзия. Что же касается каналов, то эта иллюзия связана с особенностью зрения объединять в линии и полосы произвольные сочетания пятен.

Теперь сравним карты Марса, построенные по наземным наблюдениям, с картой, составленной по всем снимкам «Маринера» (рис. 144). Наиболее заметной общей деталью является большая котловина — равнина Эллатза, далее потукруглая равнина. Затем, соседствующая с равниной Большой Стриг, затем темная полоса каньона Коррат, являющаяся частью огромной долины Маринера. Подтверждается существование других темных областей, наблюдавшихся с Земли, но ни одна из них не дает даже намека на истинный характер поверхности планеты. На предложенной У. Хартманном карте (рис. 143) нанесены кратеры, диаметром более 64 км. Обратите внимание, что они преимущественно покрывают южное полушарие, если принять за северный «геологический» полюс планеты точку с координатами 135 долготы и 35 северной широты.

Как мы видели выше, число кратеров на единицу площади служит

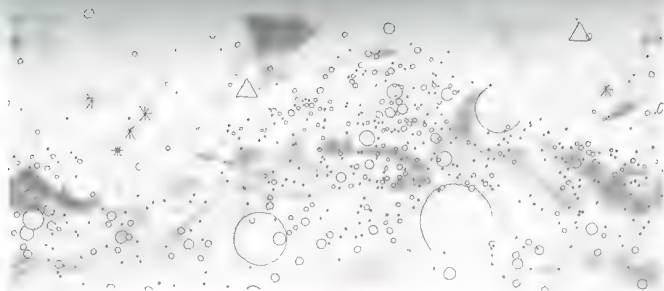


Рис. 143

Карта Марса в полосе широт $+60^\circ$. Затененные области и названия соответствуют карте, составленной по наземным наблюдениям. Круги и точки — кратеры диаметром свыше 64 км. Места посадки «Викингов» отмечены треугольниками, а большие вулканы — звездочками (С — поблизости разрешения У Хармана).

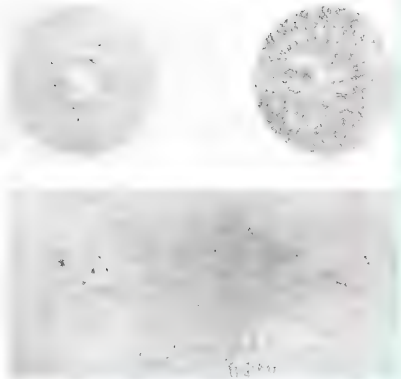


Рис. 144

Средняя часть — поверхность Марса. Мелкие звездочки — кратеры, крупные — вулканы. Масштаб — 1:100000000. Снимок сделан с орбиты космического аппарата «Маринер-9» (съемка Геологической службы США и НАСА США)

мерой возраста испещренной кратерами поверхности. На Луне старые материковые области несут на себе следы древних кратеров, в то время как на более молодых морях больших кратеров немного.

Значит, с геологической точки зрения южное полушарие древнее северного. Но почему северное полушарие помолодело? Причин для этого много. Равнины северного полушария совершенно не похожи на моря видимой стороны Луны. На них находятся самые высокие в Солнечной системе пики, громадные щитообразные, почти круговые вулканы типа вулкана Мауна-Лоа на Гавайских о-вах. На рис. 143 их положения отмечены звездочками. Район этих больших вулканов, называемых горами Фарсида, представляет собой поднятие, возвышающееся на 1,2 км над средним уровнем поверхности, измеренным от центра Марса. С учетом самых глубоких впадин, расположенных на 6 км ниже среднего уровня поверхности, полный перепад высот на Марсе дости-

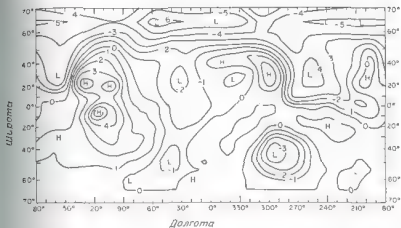


Рис 145

Горы Марса. Из-за мелкого масштаба даже такие сравнительно крупные детали, как большие вулканы, не показаны. Контуры (рис. 145) построены по данным радиолокационных измерений.

гает 27 км (на Земле он составляет 19 км, а на Луне и Венере (?) еще меньше). Горное поднятие Фарсида, однако, много меньше экваториального вздутия, обусловленного вращением Марса (около 17 км). На рис. 145 показана топография Марса, построенная по данным радиолокационных измерений.

Самые большие вулканы в районе Фарсида затмевают своих земных двойников. Наибольший из них — гора Олимп (*Nix Olympica* на рис. 143), возвышается на 21 км над окружающими равнинами, т. е. она более чем вдвое выше горы Эверест (8,8 км относительно уровня моря). Многочисленные кальдеры на вершинах гор Олимп (рис. 146) выглядят неглубокими и во многом напоминают кальдеры гавайских вулканов, таких, как Килауэа, однако кальдеры марсианских вулканов достигают в поперечнике 80 км, что соответствует наибольшей протяженности крупнейшего из Гавайских островов.

Кратер горы Арсия еще больше — около 125 км в поперечнике. С вулканами и поднятием Фарсида связаны огромные системы трещин и гряд, некоторые из них тянутся на 1000 км и в целом имеют радиальное направление из центральной области больших вулканов. Эти трещины и гряды свидетельствуют о напряжениях, возникших при поднятии всей области Фарсида.

Помимо этих гор, вулканов и потоков лавы конвекция в некогда расплавленных недрах Марса породила величественные рифтовые долины, вероятно, родственные большому океаническому рифту на Земле, которые выходят на сушу в Эфиопии. Один из них Красное море



Рис. 146 Часть кальдеры большого потухшего вулкана Олимп. Большой кратер сверху в середине имеет поперечник около 25 км, высота стены превышает 2,5 км. Обратите внимание на малочисленность ударных кратеров, что свидетельствует о молодости вулкана. (С любезного разрешения НАСА США.)

Долина Маринера и примыкающее к ней ущелье Колрат лежат немного южнее экватора и образуют большую дугу, почти параллельную экватору, длиной около 4000 км, равной радиусу Марса. Это образование начинается с предлинной разрушенной структуры сетчатой формы на западном краю к юго-востоку от больших вулканов. Само ущелье Колрат, по-видимому, начинается с хаотического рельефа (рис. 147) и развивается в восточном направлении в колоссальный каньон, иногда почти 200 км шириной, с многочисленными ответвлениями, подобными притокам (рис. 148). Местами глубина каньона, измеренная по изменению интенсивности поглощения в спектре углекислого газа, достигает 10 км. В конце концов он исчезает в Жемчужной земле, наблюдаемой с Земли в виде темной области. Прежде чем обсуждать физические процессы и хронологическую шкалу, связанные с марсианской топографией, вернемся к проблемам атмосферы, облаков, ветров, температуры, пылевых бурь и т.п., поскольку все они непосредственно связаны с глобальными глобальными структурами на планете.

Температура поверхности Марса была довольно хорошо определена по наземным наблюдениям в инфракрасных лучах, правда, значение в самый полдень было несколько завышено. Распределение температу-

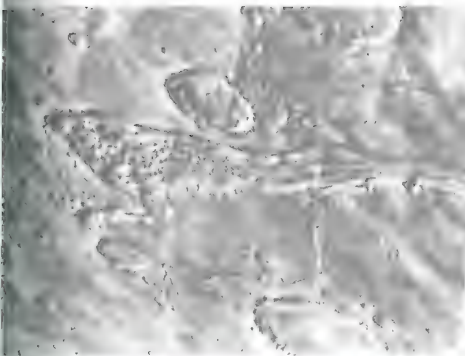


Рис. 147

Начало долины Маринера и каньона Копрат на Марсе по снимкам «Викинга-1» 3 июля 1976 г. Размеры области $145 \times 65 \text{ км}^2$ (С любезного разрешения НАСА США)

туры по поверхности (рис. 149) было найдено по измерениям с орбитального модуля «Викинга-1». Максимальная температура $+33^\circ \text{C}$ достигается вблизи подсолнечной точки (вверху справа на рис. 149). На утреннем терминаторе она равна -120°C , терминатор отчетливо виден на рисунке, там, где интервал температур между контурами уменьшается от 10°C на дневной стороне до 2°C на ночной. Большой вулкан Арсия высотой около 17 км сильно искажает изотермы (контур равной температуры) в районе южнее экватора вблизи западной долготы 120° . Обращенные к востоку склоны освещены Солнцем, а западные еще не успели нагреться, что проявляется в виде минимума -130°C . После рассвета к востоку от него видны облака или иней. Вообще, поднятие Фарсида холоднее, а районы больших каньонов и равнина Элизия теплее, чем поверхность Марса в среднем. Самая низкая температура -139°C наблюдается близ южного полюса, где может конденсироваться углекислый газ. Максимальная температура измерения в месте посадки «Викинга-1», равна $+28^\circ \text{C}$, хотя в некоторых экваториальных

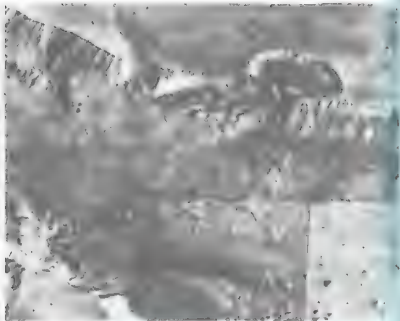


Рис. 148

Семьдесят километровый участок долины Марса, широкое ущелье Ганга (С любезного разрешения НАСА и США)

районах в полуденной точке бывает и более высокая температура. Температура на высоте 40 км опускается до -130°C и сохраняется около этого значения на больших высотах. В так называемых *оазисах* в районах озера Феникс (плато Солнца) и земли Ноя перепад температур составляет от -53 до $+22^{\circ}\text{C}$ летом и от -103 до -43°C зимой. Хьюгенс с коллегами предполагает, что эти области являются источниками водяного пара, вымерзающего на северном полюсе Марса. Итак, Марс — весьма холодный мир.

Сильно разочаровывает и атмосфера Марса. Среднее давление составляет всего 6 мбар, или $0,6^{\circ}$ от земного. Поскольку сила тяжести на поверхности Марса равна 0,38 земной силы тяжести, масса атмосферного столба над единичной площадкой едва превышает $0,2^{\circ}$ и падает до $0,07^{\circ}$ земного значения над высочайшими горами.

Атмосфера Марса, подобно венерианской в основном состоит из углекислого газа CO_2 (0,95 по объему), азота N_2 (0,027), аргона ^{40}Ar (0,016) и кислорода O_2 (приблизительно 0,02, обратите внимание на полосы CO_2 на рис. 165). Хотя отношение содержаний углекислого газа и азота очень сходно с отношением для Венеры, относительное содержание аргона гораздо выше, но абсолютное значение, вероятно, лежит в пределах всего 0,5–0,05. Большой интерес представляет содержание

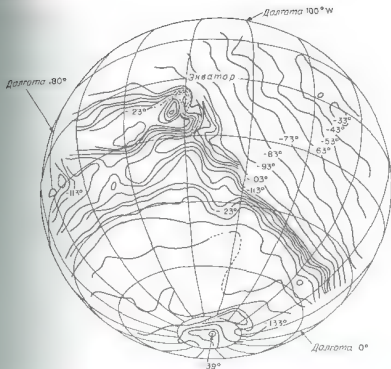


Рис 149

Температуры марсианской поверхности по измерениям орбитального аппарата «Викинг» (данные 1-10 апреля 1976 г.). Полярная температура на полюсах ниже -100°C (температура в разрезе). С данными о температуре в атмосфере см. рис. 150 (данные НАСА США)

водяного пара, особенно в связи с вопросами о природе облаков и возможности существования жизни на Марсе. Содержание водяного пара сильно меняется. Наибольшее значение, измеренное инфракрасными спектрометрами орбитальных аппаратов «Викинг», составило 0,10 мм осажженной воды. Это значение зарегистрировано над темной околополярной областью в конце лета, где оставшееся вещество, по-видимому, представляет собой грязный водный лед. Пар находился в насыщенном состоянии, что соответствовало всего лишь 2° от содержания в атмосфере азота. В то время количество водяного пара уменьшалось с широтой: 0,10 мм на полюсе, 0,015 на широте 50°N , 0,005 на экваторе и менее 0,001 мм осажженной воды на широте 40°S . «Оазис», или «влажное пятно», находился северо-западнее равнины Элада на земле Ноя. С приближением осеннего равноденствия в северном полушарии содержание водяных паров увеличивалось вблизи экватора и к югу от него. Полное

количество водяного пара в атмосфере Марса, по-видимому, остается постоянным и равным $1,3 \text{ км}^3$ воды в течение трех марсианских месяцев наблюдений.

Вопрос о сезонном перемещении водяных паров между полюсами остается открытым, вариации, возможно, связаны только с температурой и особенностями рельефа поверхности. Напротив, перемещения углекислого газа прослеживаются очень хорошо. Полное атмосферное давление в местах посадки обоих «Викингов» упало до минимума непосредственно перед осенним равноденствием на Марсе. Затем оно поднялось более чем на 30% , до максимума во время зимнего солнцестояния. Минимум давления наблюдался как раз тогда, когда южная полярная шапка достигла наибольших размеров, а максимум — когда ее размеры были минимальны. Поскольку атмосфера почти целиком состоит из углекислого газа, а при температуре южной полярной шапки возможна конденсация углекислого газа, заметная ее доля может замерзнуть, согласно оценкам С. Хесса с соотр. до 5000 км^3 . Это соответствует столу толщиной 23 см на южной полярной шапке если пренебречь некоторым количеством углекислого газа, переместившегося к северной полярной шапке и уменьшающего давление атмосферы во время зимнего солнцестояния в северном полушарии.

Но почему гораздо больше углекислого газа попадает в южную полярную шапку и выводится из нее? Вероятно, потому, что во время зимы в южном полушарии Марс находится дальше всего от Солнца. С этим вопросом связаны два других фактора — концентрация пыли в северном и южном полушарии и северным полярным областям и глобальная циркуляция пыли. Сильные пылевые бури происходят вблизи перигелия, когда в южном полушарии лето, так что систематически из-за более теплого лета в южном полушарии вода путем атмосферной циркуляции перекачивается в северное полушарие, где она удерживается на частицах пыли на грунте и выпадает в виде инея. Песчаные дюны вокруг северной полярной шапки (рис. 155) указывают на тенденцию пыли накапливаться преимущественно в этих областях, хотя одна из наиболее интересных областей, покрытых песчаными дюнами (рис. 156), находится в районе Гелеспонских гор (48°S и 33°W). Поскольку пылевые бури случаются преимущественно во время зимы в северном полушарии, пыль тоже переносится к северным полярным областям. Слой вечной мерзлоты не поддается прямым измерениям, но может достигать километровых толщин.

Общая ситуация такова. Атмосфера состоит из углекислого газа. В полярных областях температуры меняются в достаточных пределах, чтобы в одни сезоны происходила конденсация CO_2 , а в другие — сублимация. Содержание воды в холодной атмосфере крайне низкое, поэтому в глобальном масштабе она не так мобильна, как углекислый газ. Поскольку лето на северном полюсе приходится на время прохождения через афелий, северные полярные области в среднем холоднее южных. Следовательно, вода систематически собирается у северного полюса. Пылевые бури, бушующие при прохождении планеты через перигелий,

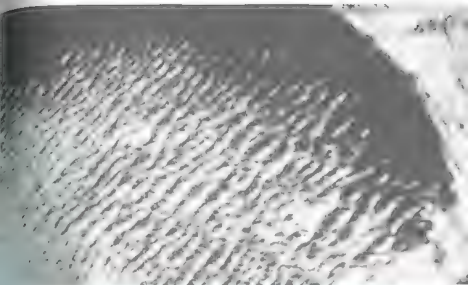


Рис. 150

Пустыня с песчаными дюнами на Марсе. Поперечник области около 50 км, так что типичное расстояние между дюнами составляет 1,2 км. Снимок с орбитального модуля космического аппарата «Викинг-1» (С любезного разрешения НАСА США)

переносят пыль к северному полюсу, где она оседает вместе с конденсатом. В это же время из южной полярной шапки происходит сублимация углекислого газа, так что поднимающийся газ препятствует оседанию пыли. Хотя на этот процесс оказывают влияние и другие факторы, очевидный результат состоит в том, что южная полярная шапка Марса в основном состоит из двуокиси углерода, а северная полярная шапка в большей мере — аккумулятор водяного льда и пыли.

В теории «оазисов» предполагается, что вода, текущая под слоем грунта из северных полярных областей, должна была бы испаряться в «оазисах». Эта теория позволяет обойти трудность, связанную с возникновением бурь в сильно разреженной атмосфере Марса. Вероятно, в этом случае пыль могла бы попадать в атмосферу при испарении воды во время «нагрева» марсианским летом южных экваториальных областей. Поэтому-то пылевые бури чаще всего происходят именно в этот сезон. Измерения градиента температуры с глубиной в марсианской коре не проводились. Но имеются убедительные свидетельства того, что вечная мерзлота — широко распространенное явление. Несомненно, температура, как на Земле и на Луне, должна возрастать с глубиной вследствие радиоактивного нагрева. Следовательно, гипотеза о существовании подповерхностных запасов воды и ее движении заслуживает

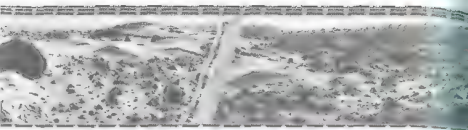


Рис. 151 Панорама, переданная посадочным модулем «Викинг-1» (Угол обзора 160°). Видны нанесенные ветром пыль и дюны. Размер большого валуна слева 1 × 3 м, расстояние от аппарата 8 м. Видим центр вилки штатива грунтозаборника «Викинга» (С любезного разрешения НАСА США.)

рассмотрения. Разумно ли помещать марсианские «каналы» под поверхность планеты? Вероятно, нет, но сама идея любопытна.

Существование пыли на Марсе демонстрируют превосходные крупномасштабные изображения, переданные на Землю посадочными модулями космических аппаратов «Викинг» (рис. 151 и 152). Согласно определению цвета, поверхность имеет красноватый оттенок. Значит, наземные наблюдения дали нам правильное представление о цвете «бога войны». Такие ландшафты — не редкость в пустыне Сахара. Вероятно, в местах посадки камни более многочисленны, чем в среднем на поверхности Марса, поскольку здесь тепловая инерция выше, чем на 80° всей поверхности. Темные области Марса обладают большей тепловой инерцией, чем светлые. Следовательно, темные области содержат больше камней или связанных частиц, тогда как светлые области покрыты

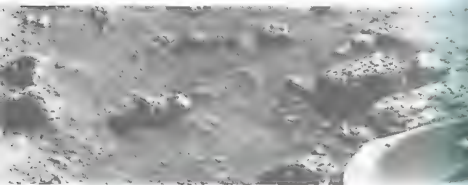


Рис. 152 Первый крупномасштабный снимок с посадочного модуля «Викинг-2», сентябрь 1976 г. Поперечники камней 10–20 см (С любезного разрешения НАСА США.)



Рис 153

Снег в районе посадки «Викинга-2». Толщина слоя, вероятно, меньше 0,1 мм, возможно, это водяной снег, выпавший вследствие конденсации двуокиси углерода на очень мелких частицах водяного льда и пыли. Затем происходит сублимация двуокиси углерода. (С любезного разрешения НАСА США)

очень мелкой пылью, здесь меньше камней и подстилающей породы. Долина Маринера и ее «кошечные» области на востоке и на севере заметно выделяются на общем фоне. Это области с высокой тепловой инерцией и поэтому относительно каменисты или состоят из связанных частиц. В отличие от вулканических равнин и равнин с подповерхностным слоем льда покрытые пылью равнины имеют, конечно, малую тепловую инерцию. Характер поверхностного материала в местах посадки «Викингов» мняется от сильно спрессованного мелкого песка до глыб и твердых камней. В течение зимы 1979 г. в окрестностях посадочного модуля «Викинга-2» конденсировалось заметное количество водяного снега (инее?), который сохранился в течение нескольких месяцев (рис. 153).

Пыль играет второстепенную роль в изменениях полярных шапок. Атмосфера красной планеты сильно разрежена, а для перемещения пыли необходимы сильные ветры. Тем не менее пыль на удивление подвижна. Сила тяжести, хотя и малая, частично компенсирует низкую плотность атмосферы. В то же время атмосфера не оказывает тормозящего действия на пылевые частицы. Поэтому-то очень мелкие песчинки

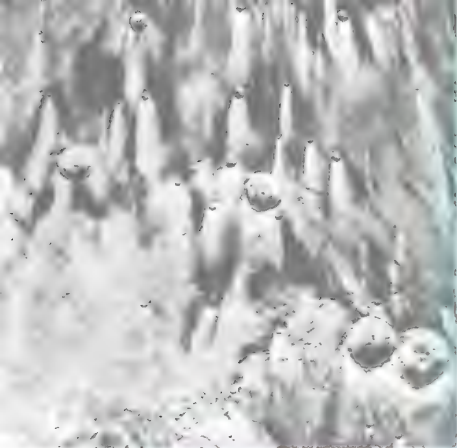


Рис 154 Ветровые шлейфы за кратерами Марса. Белые шлейфы отложения мелкого песка, а темные участки подстилающие скальные породы, обнаженные сильными ветрами (С любезного разрешения НАСА США.)

могут переноситься на огромные расстояния. При оседании каждая песчинка выбивает другие; вследствие этого, когда поднимается ветер, пылевая буря охватывает всю планету. К. Саган, Дж. Веверка и их сотрудники подсчитали, что для образования наблюдаемых на Марсе золотых полос необходима скорость ветра от 50 до 90 м/с. В местах посадки «Викингов» наблюдались несколько сильных пылевых бурь и связанные с ними изменения температуры и давления, представляющие большой интерес для метеорологов.

Белые параллельные полосы на рис 154 — это пылевые наносы, созданные господствующими ветрами. Такая полосатая структура позволяет составлять карты сезонных ветров. Темные полосы являются ре-

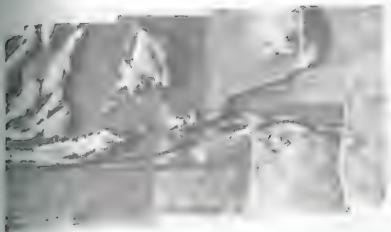


Рис. 155

Окрестности северной полярной шапки Марса в середине лета. Видны участки нарастающего водяного льда, мерзлотные террасы (песок и лед?) и песчаные дюны (справа от центра). Мозаика, составленная по снимкам, переданным «Викингом-2» (С любезного разрешения НАСА США.)

результатом обнажения подповерхностных пород под действием очень сильных ветров, дующих под углом 50° к направлению господствующих ветров. Так, потемнение равнины Большой Сирт обусловлено обнажением больших площадей поверхности под действием ветра. В северной полярной области марсианской весны появляются огромные террасы, что указывает на эпизодические настоения мерзлого песка (рис. 155). Нам не известны возраст этих отложений и их толщина. Однако, вообще говоря, полярные отложения и большие количества пыли, накопленные в кратерах и трещинах, указывают на то, что значительные площади на Марсе были в основном очищены от пыли. На Земле для ветрового переноса доступны гораздо большие количества материала, поэтому при изменениях климата площадь пустынь должна расти.

Постоянные магниты, установленные на посадочных модулях «Викингов», притягивали марсианскую пыль, поднятую тормозными ракетными двигателями, а также при втягивании образцов и разрыхлении грунта. Этот рыхлый марсианский грунт содержит от 1 до 7% высокомагнитного материала. Простейшее объяснение состоит, по-видимому, в том, что красный материал содержит магнетит, $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$, имеющий такой же химический состав, как и гематит, но другую кристаллическую структуру. Он может быть покрыт красной окисью железа. Цвет Марса, несомненно, вызывают красные окислы железа, точный состав которых остается неопределенным. Спектры Марса показывают, что темные области содержат меньше окисленного железа и больше FeO , чем светлые области, в которых преобладают трехвалентные соедине-

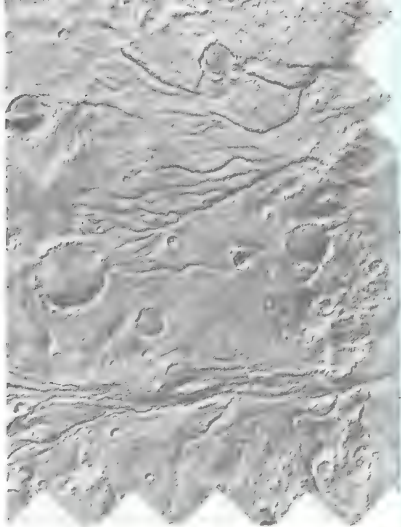


Рис. 156 Древние русла потоков на Марсе к западу от места посадки «Викинга 1». Уклон поверхности вправо около 3 км на 140 км поперек рисунка (С любезного разрешения НАСА США)

ния железа и, вероятно, глинистые минералы, возникающие при выветривании. Может присутствовать сера в качестве материала, связывающего поверхностные частицы.

Магнитные измерения в его окрестности не многочисленны, и хотя они показывают наличие головной ударной волны, очевидно, что

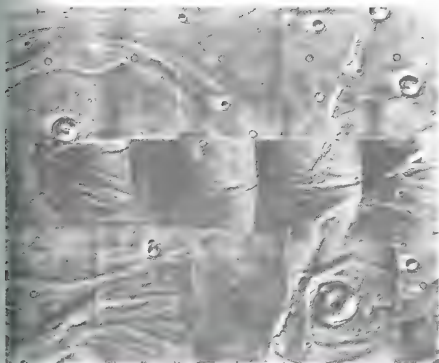


Рис 157

Мозаика составленная по снимкам «Викинга-1» района к запад-северо-западу от места посадки «Викинга-1»; видны ла-
вовые и тектонические речные долины. Размер области
200 x 250 км² (С любезного разрешения НАСА США)

у Марса нет сильного магнитного поля. Вероятно, как и у Венеры, мар-
сианская магнитосфера непосредственно взаимодействует с ионосферой.

Многие очень извилистые (меандровые) русла, разветвленная систе-
ма притоков и желоба в широких руслах (см рис 147, 148, 156, 157)
указывают на то, что в прошлом поверхность планеты бороздили
мощные потоки воды. Хотя нет свидетельств того, что вода присут-
ствует в современную эпоху, имеются многочисленные признаки нали-
чия мерзлотных образований. Были ли когда-нибудь на Марсе океаны
или озера воды? Вероятно, нет, потому что тогда должна была бы су-
ществовать плотная атмосфера, от которой остались бы тяжелые
инертные газы, а они не наблюдаются. Если на Марсе когда-то было
высокое содержание летучих веществ, то приходится допустить, что
вследствие какого-то процесса, действовавшего в глобальных масшта-
бах, редкие газы покинули атмосферу. Скорее всего это произошло сра-
зу же после начала разогрева верхних слоев. Легкие газы, в особенности

водород, образующийся при диссоциации воды, конечно, должны были исчезнуть довольно быстро. Не исключено, что когда-то на Марсе было больше воды и была мощная атмосфера, хотя вряд ли там шли дожди, текли реки и заполнялись озера. Однако на современной поверхности Марса не обнаруживается признаков глобальной эрозии, к которой ведет широкое распространение жидкой воды. Приходится расстаться с иллюзиями (а может быть, предрассудками?), что Марс когда-то был раем. Нам остается лишь верить надежду на то, что имели место энзимическое освобождение больших количеств воды из грунта или из полярных шапок, которые оставили свой след на Марсе.

Прежде чем обсуждать возможные механизмы таких явлений, рассмотрим одно важное свойство Марса — движение его полюсов. Как указывалось в гл. 5, прецессия полярной оси Земли совершается с периодом 26 000 лет и вызывается силой, действующей на экваториальное вздутие со стороны Луны и Солнца. Прецессия оси вращения Марса происходит гораздо медленнее — с периодом около 125 000 лет. Благодаря Луне наклонение земной оси к плоскости эклиптики меняется всего лишь на 1° относительно среднего значения 23,5°. Из-за отсутствия массивного спутника ось Марса колеблется значительно сильнее. У Форд рассчитал, что наклонение марсианского экватора к плоскости его орбиты может меняться в пределах от 35 до 15° относительно среднего значения 25,2°, близкого к современному. Период колебаний равен 1,8 периода прецессии, а полный цикл завершается примерно за миллион лет (рис. 158). В современную эпоху амплитуда колебаний близка к минимуму. Как указывали Р. Лейтон и Б. Меррей, изменения наклонения существенно сказываются на нагревании полярных шапок. При максимальном наклонении около полумиллиона лет назад полярные шапки должны были получать в среднем на одну треть больше солнечного тепла, чем теперь, а при минимальном — всего около двух третей современного количества, эти крайние значения разделены интервалом около 60 тыс. лет. При максимальном наклонении весь лед на полюсах может растаять, а при минимальном может вымерзнуть значительная часть атмосферы, так что полное атмосферное давление упадет ниже 1 мбар. Оценки давления для периода максимума лежат в интервале от 30 до 100 мбар. Последнее значение, вероятно, сильно завышено, но даже при таком давлении атмосфера Марса была бы гораздо тоньше земной.

Расчеты температуры и климатических условий в периоды максимального таяния полярных шапок весьма приближенны. Способен ли углекислый газ создать парниковый эффект и повысить температуру планеты? Достаточно ли углекислого газа и воды, чтобы вызвать радикальные изменения на планете? Не превратится ли Марс в пыльный шар при более высокой плотности атмосферы и сильных ветрах? Не повысят ли облака и пыль альбедо настолько, что планета будет скорее охлаждаться, чем нагреваться? Достаточно ли времени около 10 000 лет, чтобы значительно изменить распределение вечной мерзлоты? Поскольку пока нет ответов на эти и другие вопросы, точное предсказание невозможно. Легче предсказать ситуацию при минимальном наклоне-

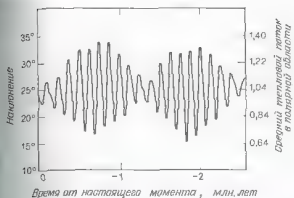


Рис 158

Изменения угла наклона марсианского экватора к его орбитальной плоскости (ось слева) и соответствующее среднее количество солнечного тепла, получаемое полюсами (ось справа) за единицу принято современное среднее значение (по Y ордату)

нии Атмосфера будет крайне разреженной, даже слишком разреженной для возникновения пылевых бурь, а размеры обеих полярных шапок будут больше, чем их максимальные размеры в современную эпоху. Высокоэнергичные частицы солнечных вспышек будут бомбардировать поверхность. Марс будет находиться в состоянии «анабиоза».

Вспомним, что эти циклы повторялись уже тысячи раз. Если Марс потерял значительную часть своей атмосферы, то можно с некоторым основанием предположить, что, когда Марс был моложе, на нем произошли какие-то катастрофические события. Затем наступали спокойные периоды, когда гораздо больше воды вымерзло на полюсах и образовались слои вечной мерзлоты. А что если полоса дрейфовали по поверхности планеты, вследствие чего менялись широты? Исходя из таких вполне разумных предположений довольно легко объяснить значительные следы эрозии на Марсе. Рассмотрим начало огромной долины Маринера (рис. 147), там, где она начинается с хаотического рельефа и 6-километрового кратера. В конце спокойного периода при минимальном наклоне оси в этой области находился слой мерзлоты, покрытый сыпучим грунтом типа пыли или вулканического пепла. Глубоко под ним мог находиться большой водоносный пласт. Тепло недр планеты могло способствовать его существованию. По мере того как давление на такие водоносные горизонты увеличивалось, достаточно было слабого удара, чтобы гигантский поток воды вышел на свободу. Тогда хаотический рельеф на рис. 147 — это результат проседания наружных слоев вследствие выхода подземных вод. Расчеты показывают, что возможные потоки в несколько сотен миллионов кубометров воды в секунду. Такой мощный поток способен создать структуры, связанные с движением во-

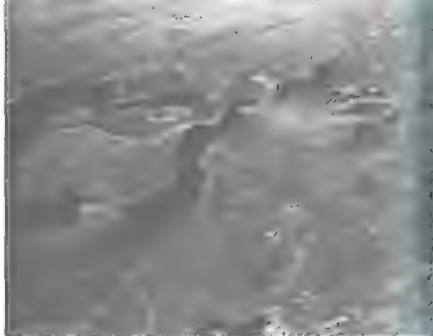


Рис. 159 Вид с воздуха на «сухие потоки» в 150 км к западу от Спокан, шт. Вашингтон, являющиеся западным краем Гранд-Каньона. Они были созданы беспрецедентным ледниковым потоком около 20 млн лет назад (с разрешения Геологической службы США)

ды и ледников (флювиотляциальные образования), которые наблюдаются в нескольких марсианских руслах (рис. 148, 156, 157).

В пользу этой теории катастроф служат следы подобных событий, обнаруженные на Земле. В 1923 г. Дж. Брец представил доказательство того, что Ченселд-Скэбленд в восточной части шт. Вашингтон (рис. 159) образовалась в результате такого катастрофического наводнения. Эта теория, зародившаяся свыше двух десятилетий назад, была очень благожелательно принята геологами. По-видимому, около 2000 км^3 ледниковой воды излилось со скоростью порядка 20 млн м^3 в секунду и породило Ченселд-Скэбленд. Площадь, занятая хаотическим рельефом на рис. 147, более 900 км^2 , так что долину Маринера мог породить слой воды полукилометровой толщины.

На крупномасштабных снимках Марса, сделанных с орбитальных модулей «Викингов-1 и 2», видны разнообразные причудливые образования, многие из них похожи на детали поверхностей Луны и Меркурия, другие уникальны. Нигде больше в Солнечной системе не обнаружено такой белой породы, как показанная на рис. 160. Она занимает пло-

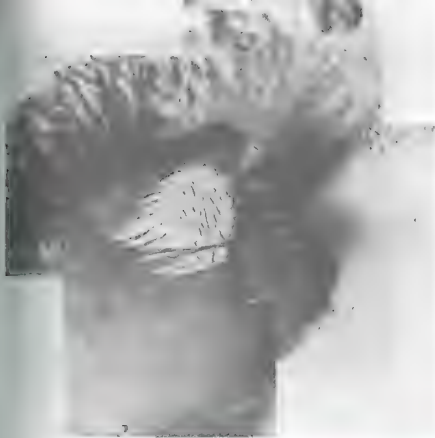


Рис 160

«Белая порода» по снимкам, переданным с орбитального модуля «Викинг-1» в 1978 г. координаты 8°S и 135°W , размеры $14 \times 18 \text{ км}^2$. (С любезного разрешения НАСА США)

щадь $14 \times 18 \text{ км}^2$ и лежит внутри 93-километрового кратера. Вследствие близости к экватору это - не лед и не снег.

Единственный метод прямого определения возраста характерных особенностей Марса основан на подсчетах метеоритных кратеров. Правда, он хорош только для определения относительного возраста больших площадей и непригоден для абсолютной датировки. У нас нет никаких точных сведений о числе метеоритов, выпадавших на Марс, так как он расположен ближе к краю пояса астероидов, чем Земля и Луна, и гораздо ближе, чем Меркурий. Поэтому исследователи пришли к согласию в том, что касается относительных возрастов марсианских формаций, но не могут прийти к общему выводу об их абсолютном возрасте. Значительная часть более древнего, густо покрытого кратерами

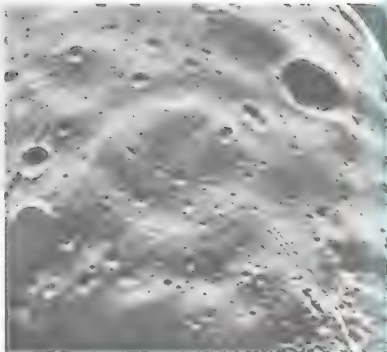


Рис 161 Участок Фобоса размером 9,5 км (С любезного разрешения НАСА США.)

южного полушария (рис 143), вероятно, имеет возраст 4 млрд лет. Кора северного полушария, вероятно, разрушилась в результате изостатического опускания примерно в то же время. Горный район Фарсида, вероятно, образовался довольно быстро в интервале от 4,0 до 3,5 млрд лет назад. В этот период были наиболее активны грандиозные вулканы. Как долго они оставались активными, неизвестно, некоторые исследователи полагают, что они активны еще и теперь, тогда как большинство склоняется к тому, что они потухли около 2 млрд лет назад. Для абсолютной датировки необходимо исследовать изотопный состав образцов, либо доставленных с Марса на Землю, или *in situ*.

Если бы удалось исследовать образцы вещества с крошечных марсианских спутников (рис 6), то можно было бы установить не только их возраст, но и происхождение. Обзор Фобоса с близкого расстояния по программе «Викинг» (рис. 161) показывает обилие поверхностных образований, вызванных метеоритной бомбардировкой. Спутники обращаются так, что их большие оси всегда указывают на планету. Неожиданным оказалось различие поверхностной структуры Фобоса и Деймоса.

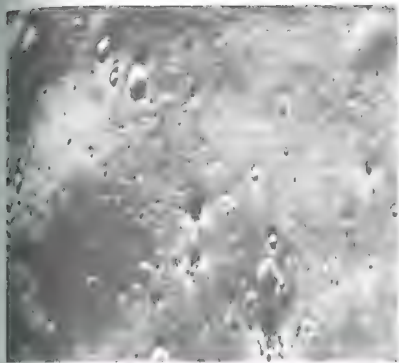


Рис 162

Снимок Деймоса с орбитального модуля «Викинга-2». размеры области $1,2 \times 1,5 \text{ км}^2$, различимы детали размерами до 3 м. С любезного разрешения НАСА США.)

(рис. 162). На Фобосе отчетливо видны борозды, связанные с кратером Стикни, диаметр которого (8 км) достигает трети диаметра спутника. Эти борозды поперечником 100–200 м могут быть следствием почти катастрофического падения метеорита, приливных напряжений, первичных разломов или наслоения вещества или кратерных цепочек, которые также прослеживаются на поверхности. Определенного ответа пока не получено.

На снимках хорошо видно (рис. 162), что на Деймосе слой реголита значительно толще, чем на Фобосе. Кратеры диаметром менее 50 м, по-видимому, покрыты слоем пыли, там и тут видны обломки скал размером с сельский дом. Не ясно, присущи ли основные различия поверхностной структуры этим телам с самого начала или возникли вследствие метеоритной бомбардировки. Оба спутника имеют одинаковый серый цвет и отражают свет подобно углистым хондритам — простейшим метеоритам.

Предположение, что Деймос и Фобос захваченные астероиды, не

находит поддержки у небесных механиков, и хотя оно маловероятно, но не может быть полностью опровергнуто. Более правдоподобно, что спутники образовались в котле, окружавшем Марс, быть может, вместе с другими спутниками, давно потерянными Или же это фрагменты большого спутника, распавшегося в результате столкновения. Эта гипотеза находит поддержку из теоретических соображений. Фобос больше, чем Деймос, и под действием приливного трения приближается к Марсу быстрее, чем Деймос. Следовательно, Фобос, который находится ближе к Марсу, когда-то пересек орбиту Деймоса. Чем больше мы узнаем о таких телах, тем глубже проникаем в область неизведанного.

Главная, вероятно, даже самая главная цель полетов «Викингов» к Марсу состояла в поисках форм внеземной жизни. Были выполнены три сложных биологических эксперимента: пиролизное разложение, газовый обмен, разложение метки. Они основаны на опыте изучения земной жизни.

Эксперимент по *пиролизному разложению* был предназначен для выявления процесса фотосинтеза с участием углерода, содержащегося в атмосфере. Пробы грунта выдерживались в течение 5 сут в среде, идентичной среде на поверхности планеты, но к атмосферному газу добавлялись окись и двуокись углерода, меченные радиоактивным изотопом углерод-14. Образцы освещались ксеноновой лампой, имитирующей солнечный свет, причем ультрафиолетовое излучение поглощалось фильтром, чтобы исключить небиологические эффекты. Затем грунт нагревался до 625 °C. При этом органические вещества, если бы они возникли, должны были бы разложиться, причем образовавшиеся пары были бы радиоактивными.

Разрабатывая эксперимент по *газовому обмену*, ученые предполагали, что марсианская жизнь должна использовать воду в качестве растворителя. Образцы грунта помещались в пористый сосуд, расположенный в инкубационной камере, наполненной атмосферой из углекислого газа, криптона и гелия при марсианском атмосферном давлении. В течение первых семи суток сосуд выдерживался в этой камере над смесью органических питательных веществ, растворенных в воде, после чего химический состав газа над грунтом определялся с помощью газового хроматографа. Контролировалось содержание водорода, азота, кислорода, метана, углекислого газа, а также криптона, взятого в качестве эталона. При наличии микроорганизмов в грунте должен был измениться газовый состав атмосферы в камере. При отсутствии признаков биологической активности уровень влажности мог подняться до дна пористого сосуда.

Эксперимент с *разложением метки* был также основан на допущении о необходимости воды для существования гипотетической марсианской жизни. Предполагалось, что микроорганизмы должны усваивать органические молекулы и ионы из раствора питательных веществ («бульона») и выделять в результате такого цикла газ, содержащий, в частности, углерод питательного раствора. Этим раствором, меченным радиоактивным изотопом углерод-14, смачивался образец грунта.

га, помещенный в закрытую темную камеру с марсианским «воздухом». Затем измерялся уровень радиоактивности газа в камере, чтобы определить, не выделились ли какие-либо соединения углерода в результате жизнедеятельности марсианских организмов.

Хотя все три биологических эксперимента дали положительные результаты, они, вероятно, имеют небιологическую природу и могут быть объяснены неорганическими химическими реакциями питательного раствора с веществом марсианской пустыни. Частицы грунта, по-видимому, покрыты окисью железа, это покрытие образуется в разреженной атмосфере с крайне низким содержанием воды при наличии интенсивного ультрафиолетового излучения. Бурные реакции в двух случаях (кроме эксперимента с пиролизным разложением метки) могли иметь место и при отсутствии органического вещества на Марсе. Чтобы лучше понять полученные результаты, эксперименты продолжены в земных лабораториях.

Если бы не был проведен молекулярный анализ вещества в эксперименте, специально не предназначавшемся для биологических тестов, еще оставалась бы какая-то надежда на существование жизни в песчаных пустынях Марса. Этот эксперимент проводился с помощью хромато-масс-спектрометра. Размельченные образцы грунта нагревались до 200, 350 и 500°С в течение 30 с. Летучие соединения и вещества, образовавшиеся при нагревании, сначала анализировались в колонках газового хроматографа, а затем улавливались палладиевым сепаратором для дальнейшего анализа в масс-спектрометре. В первом из отобранных образцов грунта были отождествлены следы загрязнений в самом приборе (метилхлорид и компоненты фреона-Е). Это показало, что система функционирует надежно. Вскоре после этого возглавляемая К. Биманом группа ученых из 11 человек сообщила, что «ни одна из пяти хроматограмм, полученных в экспериментах, не дала каких-либо указаний присутствия органических соединений в двух образцах марсианского грунта. Вместе с тем при 350 и 500°С выделились значительные количества воды». Пределы содержания некоторых гидрокарбонатов, кислородсодержащих, азотсодержащих или серосодержащих соединений оказались менее 0,01 частицы на миллион.

Поэтому можно утверждать почти с полной уверенностью, что в марсианских пустынях нет никаких следов жизни. Ведь описанные эксперименты дали положительные результаты в земных пустынях и даже в Антарктиде. Если на Марсе есть жизнь, то ее надо искать где-то в другом месте. Но перспективы не очень обнадеживают. Правда, есть надежные свидетельства широкого распространения воды на Марсе в прошлом, по крайней мере ее периодического появления. Быть может, удастся открыть какие-то формы жизни в «оазисах» или на дне больших каньонов, подобных долине Маринера.

12

Юпитер и его спутники

Обратимся теперь к полной противоположности маленьких каменистых планет земной группы — колоссу Юпитеру, видимая поверхность которого подвержена непрерывным изменениям. Эта планета находится далеко от Солнца; когда Юпитер ближе всего к Земле, расстояние до него составляет около 630 млн. км. Масса Юпитера более чем в 300 раз превосходит земную, а объем больше земного в 1000 раз. В телескоп Юпитер выглядит как золотистый диск, пересеченный темными и светлыми полосами, примерно параллельными друг другу. Глаз легко различает красноватые и коричневатые оттенки. На их фоне видны неправильные облакоподобные пятна (рис. 8, цветные фотографии I и II). Диск кажется слегка сплюснутым перпендикулярно полосам, тщательные измерения подтверждают, что экваториальный диаметр на 1/15, или 0,7 земного диаметра, больше полярного диаметра.

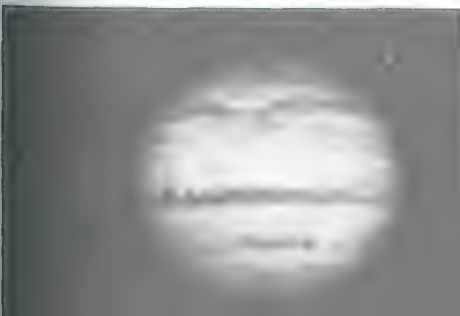
Уже за час наблюдений планета заметно поворачивается — ведь полный оборот она совершает всего за 9 ч 55 мин. В следующую ночь мы заметим, что система полос практически не изменилась, лишь отдельные детали слегка изменяются. За несколько недель структура полос заметно трансформируется, хотя общий характер деталей сохраняется (цветное фото I). Поскольку ось вращения перпендикулярна системе полос, их можно объяснить зональной циркуляцией атмосферы типа земных пассатов.

Юпитер вращается очень быстро. Экваториальная область вращается гораздо быстрее, чем более высокоширотные области. Ее период вращения на 5 мин короче и равен приблизительно 9 ч 50 мин. Периоды от 9 ч 51 мин до 9 ч 53 мин наблюдаются редко; вращение с таким периодом, по-видимому, неустойчиво. Линейные скорости перемещения деталей на экваторе — около 40 000 км/ч. Эти периоды вращения относятся только к высотам, на которых наблюдаются облака. Наблюдения радиоизлучения Юпитера показывают, что ось его мощного магнитного поля наклонена на 10° к оси вращения. Магнитное поле вращается весьма равномерно, с периодом 9 ч 55 мин 29,37 с, а это указывает на почти твердотельный характер вращения планеты под слоем облаков.



Рис 163.

Фотографии Юпитера, снятые на 5-метровом рефлекторе в синих (вверху) и красных (внизу) лучах. Обратите внимание на то, что в красных лучах Большое Красное пятно по существу исчезло. Видны Ганимед и его тень. Ю; вверху. Слева внизу для сравнения показана Земля (Фотографии обсерваторий Маунт-Вилсон и Маунт-Паломар.)



Центробежная сила, возникающая вследствие вращения, достаточна для создания видимого сжатия, хотя сила тяжести на Юпитере в 2,6 раза больше, чем на поверхности Земли. Однако если бы внутреннее строение Юпитера было подобно строению Земли, то сжатие должно было бы быть еще больше. Значит, плотность с глубиной у Юпитера растет быстрее, чем у Земли. Поскольку средняя плотность равна всего $1,34 \text{ г см}^{-3}$, можно сделать вывод, что Юпитер, подобно Солнцу, состоит в основном из легких газов, главным образом водорода и гелия. Сравнение внутреннего строения Юпитера и других планет приведено в гл. 14.

Присутствие очень протяженной атмосферы очевидно из данных прямых наблюдений. Наиболее поразительной особенностью юпитерианской атмосферы является Большое Красное пятно, впервые замеченное в 1830 г. Это овал кирпично-красного цвета, протянувшийся параллельно экватору приблизительно на 50 000 км (почти на четыре земных диаметра!). Временами оно более заметно, а временами почти исчезает, но больше никогда оно не было таким ярким, как в первые годы после открытия. На рис. 163 показаны снимки Юпитера с Большим Красным пятном в синих и красных лучах. В синих лучах пятно заметно темнее диска планеты. В красных лучах пятно почти исчезло. Если бы оно было белым, то в обоих цветах было бы видно одинаково хорошо. Таким образом, беспристрастная фотопластика подтверждает, что Большое Красное пятно действительно красное. Скорость его вращения непостоянна, и оно заметно дрейфует по поверхности планеты. В результате этого дрейфа оно прошло путь, равный трем оборотам от носителя своего среднего положения на планете, рассчитанного при постоянном значении периода. Такая подвижность показывает, что пятно плавающее возмущение. По-видимому, оно постепенно затухает. Погрязающие изображения системы Юпитера, сделанные космическими аппаратами «Пионер-11» и «Вояджер-1 и 2», и физические измерения позволяют глубже понять сложную и грандиозную метеорологию атмосферы Юпитера. Но познакомимся сначала с ее химическим составом.

Темные полосы в спектрах планеты (рис. 164) принадлежат аммиаку (NH_3) и метану (CH_4). Метан преобладает и в спектрах других планет-гигантов. Остальные темные линии в этих спектрах принадлежат газам внешнего слоя Солнца и земной атмосферы. Т. Данхем из обсерватории Маунт-Вилсон отождествил метан и аммиак, сжимая их отдельно в 20-метровой трубе. Он обнаружил, что линии поглощения, возникшие в спектре светового луча, дважды прошедшего через трубу, имеют такие же длины волн, как линии в спектре Юпитера. Слой газообразного аммиака толщиной 10 м при нормальном атмосферном давлении эквивалентен его количеству, содержащемуся в юпитерианской атмосфере до глубины, на которую проникает солнечный свет прежде, чем отражится по направлению к Земле. Для метана соответствующее значение составляет 160 м. Продолжающиеся наземные и космические наблюдения приносят все больше сведений о химическом составе атмосферы

Таблица 4

Химический состав
атмосферы Юпитера

Газ	Доля по объему, %
Водород, H_2	90
Гелий, He	10
Метан, CH_4	0,07
Аммиак, NH_3	~ 0,01
Этан, C_2H_6	0,003
Вода, H_2O	0,0006
Ацетилен, C_2H_2	0,0005
Фосфин, PH_3	0,0005
Оксид углерода, CO	Следы
Германий, GeH ₄	Следы
Дейтерий, D	В виде CH_3D

Юпитера (табл. 4). Как и ожидалось, преобладают водород и гелий. Хотя полосы поглощения метана и аммиака преобладают в инфракрасном спектре, их процентное содержание не намного больше, чем компонентов, находящихся на пределе обнаружимости (рис. 165). Вода вымерзла, сохранившись в газообразном состоянии в едва ощутимых количествах. Средняя молекулярная масса атмосферы Юпитера равна 2,2 атомной единицы массы. Такое же значение было получено по наземным наблюдениям ослабления блеска звезд при их покрытии планетой. Над слоем облаков атмосферное давление падает вдвое на каждые 10–12 км. Легкие газы сжимаются вследствие большой силы тяжести. Температура с высотой падает быстро: от $113^\circ C$ при давлении 1,0 атм, или примерно 1 бар, до $-160^\circ C$ при давлении 0,03 бар.

Относительные высоты характерных деталей атмосферы Юпитера можно непосредственно сравнить на рис. 166. На снимке, сделанном в темной полосе метана в ближней инфракрасной области спектра, самое яркое изображение дают самые верхние слои, где метана мало. Темные области расположены глубже. Снимок, сделанный на длине волны непрерывного спектра вблизи темной полосы, позволяет видеть отдельные детали. Облака над Большим Красным пятном и экваториальным поясом расположены высоко в атмосфере. На снимке выделяются полярные области, в которых происходит рассеяние от слоя дымки, образующейся очень высоко в этих холодных областях Юпитера.

Чтобы понять метеорологию Юпитера, вспомним, что на Земле облака, ветры и циркуляционные течения обусловлены солнечным теплом, достигающим поверхности и нижней атмосферы. Радиометрические измерения Юпитера указывают на генерацию тепла в недрах самой планеты, и его собственное тепловое излучение примерно вдвое превышает поток энергии, поступающей от Солнца. Кроме того, на Юпитере отсутствует твердая поверхность и какой-либо рельеф. Тепло из недр выносится путем вертикальной конвекции, порождающей турбу-

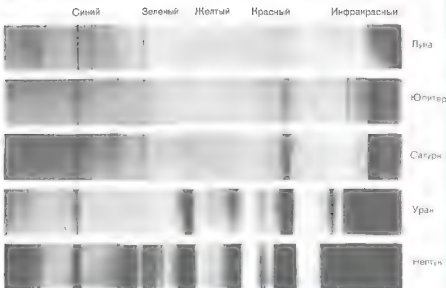


Рис. 164. Спектрограммы Юпитера и Нептуна. Широкие темные полосы поглощения, особенно заметные в спектре Нептуна, принадлежат метану (спектры получены в Сатурновской обсерватории)

лентные вихри. На Земле нагрев происходит в основном в экваториальных областях, и здесь теплый воздух поднимается в атмосферу. Растекаясь затем в направлении к полюсам и опускаясь вниз на средних широтах, где линейная скорость вращения поверхности Земли ниже, чем на экваторе, эти воздушные потоки смещаются к востоку. Следовательно, на средних широтах преобладают западные ветры. Ближе к экватору дуют пассаты, питаемые энергией атмосферы более высоких широт и направленные с востока на запад, т.е. восточные пассаты. В областях циклонических возмущений воздух втягивается в область низкого давления. В северном полушарии циклон вращается против часовой стрелки, в южном — по часовой стрелке, поскольку воздушный поток, движущийся к экватору, отклоняется к западу, а удаляющийся от экватора — к востоку. Следовательно, при сближении воздушных масс создается типичное циклоническое вращение. Это упрощенное описание картины земной циркуляции дает некоторое представление о сложной системе циркуляции на Юпитере.

На рис. 167 показаны различные зоны Юпитера относительно экватора. В экваториальной зоне $\pm 9^\circ$ течения направлены строго с запада на восток (западные ветры), скорость здесь приблизительно 100 м/с. Вблизи широт $\pm 20^\circ$ ветры дуют с востока на запад со скоростью около

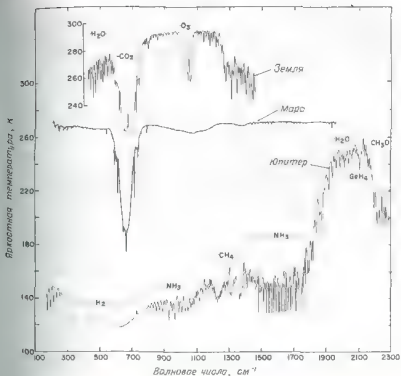


Рис. 165

Спектры Земли, Марса и Юпитера, измеренные с помощью инфракрасных телескопов. Длина волны 1000 м соответствует 10 мкм (с Земли это расстояние — Хайла-Гора, крупнейший вулкан в космических полетах, НАСА США)

50 м/с своего рода слабые пассаты. Большое Красное пятно увлекается на запад вместе с южной тропической зоной. Дальше от экватора на умеренных широтах снова видны узкие движущиеся с высокой скоростью на запад белые полюсы. На изображениях, переданных «Вояджером», северная умеренная зона шире, более однородна и движется быстрее, чем южная. Со временем ситуация меняется и даже может стать обратной. Обращают внимание долговременные изменения, показанные на рис. 168.

Между основными течениями заметны вихри и струи. Большое Красное пятно не связано с глубокими слоями планеты. В нем наблюдается подъем вещества из верхних областей и растекание его от центра. Этим-то и объясняется низкая температура пятна и антициклоническое вращение в нем, т.е. против часовой стрелки в южном полушарии,

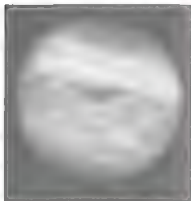
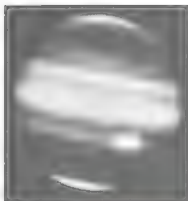


Рис 166

Горизонтальная линия, разделяющая изображения, — граница между двумя изображениями, полученными с помощью телескопа Аризонского университета.)

с периодом около 7 сут. Белые овалы представляют собой подобные возмущения, они появились в 1939 г и в настоящее время сжимаются. Большое Красное пятно также сжимается, но его возраст не известен, возможно, оно образовалось гораздо раньше, чем было обнаружено. Метеорологи окончательно отказались от гипотезы, что Большое Красное пятно и белые овалы — следствие катастрофических явлений, таких, как извержения вулканов или падения метеоритов. Они должны развиваться, расти и поддерживаться за счет конвективных ячеек, которые выносят внутреннее тепло Юпитера из недр к видимой поверхности, откуда оно излучается наружу. Полученные с помощью телекамер «Вояджеров» последовательные серии снимков позволяют исследовать структуру движения. Они показывают, что вокруг Большого Красного пятна существуют вихри, вероятно, пробивающие себе путь сквозь примыкающие к нему облачные образования. Некоторые вихри сталкиваются, другие закручиваются в жгуты и исчезают. Для специалистов по физике атмосферы данные, собранные «Вояджерами», — настоящая золотая жила и призыв к разработке детальной теории.

Облака состоят в основном из аммиака, причем температура лежит в подходящих пределах, от -100 до -160 °C. При давлении 1 атм аммиак кипит при -33 °C и плавится при -78 °C, так что он легко вымерзает в атмосфере Юпитера, но при малом давлении паров его достаточно для появления спектральных полос. Метан кипит при -161 °C и плавится при -184 °C, поэтому существование жидкого или кристаллического метана почти полностью исключается.

Облака на Юпитере простираются в интервале высот примерно 12 км, почти так же как и земные облака. Изредка в умеренных зонах мы проникаем до глубин, соответствующих более чем двум земным ат-

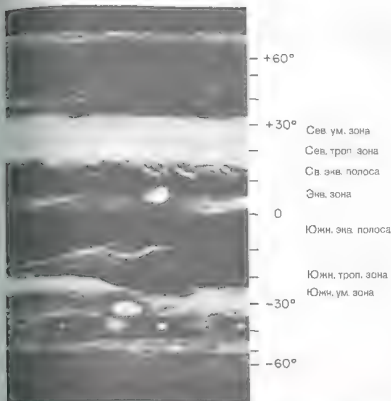


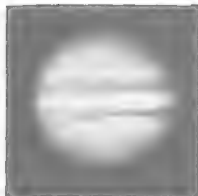
Рис. 167

указаны широты зон и полос экваториальная, троп. тропическая, ум. умеренная. (Сфотографировано с разрешения НАСА США.)

мосферам. Таким образом, диапазон давлений для облаков на Юпитере видимых на рис 166, также сравним с диапазоном для земных облаков

На цветных фотографиях отчетливо видно разнообразие цветов и оттенков в нескольких поясах и покрытых облаками районах (фото I и II). Устойчивые атмосферные составляющие не могут придать Юпитеру такую окраску. Окрашивающие вещества должны появляться, принимать участие в циркуляции и исчезать: иначе планета приобрела бы постоянную окраску. Возможно, из глубины с помощью механизма, напоминающего извержения вулканов, поступают окрашенные металлические соединения, а затем они оседают или подвергаются химическим реакциям в атмосфере. Р. Вилдт считает, что наблюдаемый цвет обус-

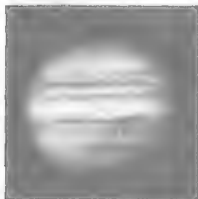
1909



193



1914



1928



1936



1938



Рис. 168

Медленные изменения на Юпитере. Фотографии получены в 10-ты. указанные на рисунке. На снимках 1914 и 1938 гг. можно заметить тени спутников. (Фотографии Э. Слайфера, Ловелловская обсерватория)

довлен натрием, а Г. Юри связывает окраску облаков с органическими молекулами. Действительно, К. Саган и С. Миллер, пропуская через смесь газов, моделирующую атмосферу Юпитера, искровые разряды, получили ярко окрашенные органические молекулы. Они предполагают, что в таких облачных турбулентных протяженных атмосферах электрические разряды приводят к образованию быстро распадающихся окрашенных соединений. Космические аппараты «Вояджер-1 и 2» зарегистрировали мощные вспышки молний на Юпитере, сравнимые с сильнейшими грозовыми разрядами на Земле. Никакой зависимости между молниями и цветом пока не найдено.

Обнаружение на Юпитере фосфина, PH_3 , указывает на возможное окрашивание Большого Красного пятна кристаллами красного фосфора, образующегося при разложении фосфина под действием солнечного излучения. Во всяком случае, присутствие фосфина, германия и окиси углерода указывает на сильное вертикальное перемешивание вследствие конвекции и вихрей, возникающих на больших глубинах.

Радиоастрономические исследования Юпитера также принесли ряд новых замечательных результатов и поставили некоторые интересные вопросы. В 1955 г. Б. Берк и К. Франклин, Институт Карнеги в Вашингтоне, изучая радиозвезды на длине волны 13,5 м, обнаружили, что Юпитер также является полупериодическим источником радиоизлучения. Затем К. Шайн в Австралии изучил радионаблюдения прошлых лет вплоть до 1951 г. и открыл, что радиоизлучение должно быть связано с определенными районами поверхности Юпитера (рис. 169). Хотя радиоизлучение регистрируется не при каждом обороте Юпитера, на определенных долготах систематически генерируются всплески, указывающие на вращение источников как твердого тела с периодом 9 ч 55 мин 29,37 с. Энергия всплесков радиоизлучения Юпитера соответствует энергии миллиарда одновременных вспышек молний на Земле; всплески, по-видимому, очень кратковременны малые доли секунды. Они почти никогда не наблюдаются с Земли на длинах волн свыше 20 м из-за поглощения в земной ионосфере. Не удивительно, что «Вояджеры» регистрировали очень длинноволновое излучение и шумовые бури в диапазоне длин волн от 3 до 30 км. или в диапазоне частот от 100 до 10 кГц. Их источник, очевидно, связан с внутренней частью магнитосферы, начинающейся, по-видимому, от верхней границы ионосферы Юпитера, и возможно, с движением внутреннего спутника Ио.

В микроволновом диапазоне температура Юпитера близка к ожидаемому из инфракрасных наблюдений значению — 143 С, но с увеличением длины волны вычисленная эффективная температура становится гораздо выше и указывает на то, что Юпитер, подобно Земле, имеет магнитное поле и радиационный пояс, в котором непрерывно генерируется очень высокочастотное радиоизлучение. Напряженность магнитного поля на порядок больше, чем геомагнитного поля, а магнитная ось наклонена на угол около 10° относительно оси вращения. Этим частично объясняется полупериодический характер радиовсплесков на длинных волнах. Излучение в дециметровом диапазоне, не-

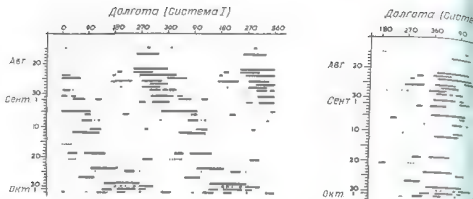


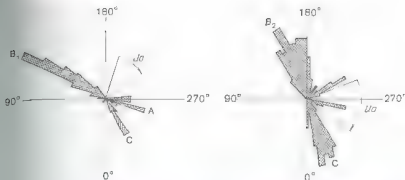
Рис. 169

Рис. 169. Распределение радиопульсов Юпитера в I и II периодах наблюдений. Слева — из-за различий периодов радиовсплесков и вращения видимой поверхности облаков наблюдается систематический сдвиг по долготе за время наблюдений (наклоны соответствующих интервалов долгот). Справа — исправленный период вращения приводит к синхронизации радиовсплесков с вращением твердого (?) ядра

сколько выше и несколько ниже 3000 мегагерц, очевидно, создается релятивистскими электронами, движущимися по винтовым траекториям вдоль магнитных силовых линий в магнитосфере. Они сильнее всего излучают вблизи плоскости магнитного экватора, позволяя определить наклон и направление оси магнитного поля относительно оси вращения. Радиои兹лучение достигает максимума, когда Земля проходит через полюсность магнитного экватора Юпитера.

«Вояджеры» обрисовали магнитосферу Юпитера, во многом похожую на земную, но гораздо больших размеров. Головная ударная волна в солнечном ветре на дневной стороне находится на расстоянии приблизительно 100 радиусов Юпитера (R_J), или 0,05 а.е., а сама магнитосфера простирается на $70 R_J$, или на 5 млн. км. В нее погружены все галилеевы спутники. На ночной стороне магнитосфера прослеживается приблизительно до $170 R_J$, или 0,08 а.е.

Загадочная и сложная структура магнитосферы начала проясняться в 1964 г., когда Е. Бигг открыл, что излучение в диапазоне 10 м наблюдается только при определенном положении внутреннего галилея спутника Ио. Рис. 170 показывает удивительную связь между долготами на Юпитере, на которых происходит излучение из определенных областей A , B_1 , B_2 и C , когда Ио находится в одном из двух интервалов долгот. Всплески радиои兹лучения происходят редко, исключая случаи, когда Ио перескакивает плоскость «магнитного диска» Юпитера по одну сторону планеты, при наблюдении с Земли. Другие спутники, по-видимому, редко, если это вообще случается, создают аналогичный эффект.

P_{MC} 170

Долготы Ио (слева 195 235°, справа 250 300), на которых в областях В, В₁ и В₂ произошло разделение магнитных осей на равном меридиане, а также дифференциация Ио в зависимости от экваториальной долготы, в отличие от качества дуг, которые в бортовых ракурсах имеют разную поверхность. (По К. Ольсону и А. Смит)

хотя «Вояджеры» нашли аномалию в магнитном поле Юпитера на расстоянии Ганимеда.

Загадка Ио начала раскрываться в 1973 г., когда Р. Браун открыл эмиссионные линии натрия в ее спектре. Д. Джадж и Р. Карлсон на основании наблюдений «Пионера-10» нашли, что Ио заключена в тороидальное водородное облако, окружающее Юпитер. Наземные наблюдения подтвердили, что натриевое облако существует и яркость его меняется с положением на орбите, поскольку излучение атомов натрия пропорционально приходящему солнечному излучению. При движении атомов натрия с высокой скоростью вокруг Юпитера их линии поглощения смещаются относительно линий натрия в спектре Солнца вследствие эффекта Доплера (см с 250). По данным «Вояджера-2» установлено, что в горе концентрация плазмы примерно на $1000 \text{ электрон см}^{-3}$ выше, чем в его окрестностях. Следовательно, связанное с Ио радиоглушение вызывается электронами, движущимися по винтовым траекториям в возмущенных Ио и сопутствующей плазмой магнитных полей в магнитосфере Юпитера.

Кольцо и спутники Юпитера

Система Юпитера с 1610 г. выросла от четырех спутников, которые тогда впервые обнаружил Галилей, до четырнадцати. Кроме того, «Вояджер-1» открыл в 1979 г. внутреннее кольцо (рис. 171). Внешний край кольца, как его увидел «Вояджер», прилегает к орбите также недавно открытого крошечного XIV спутника диаметром, по-видимому, всего лишь 40 км. Внутренний край лежит на расстоянии 0,8 радиуса планеты от видимой границы облатков. Ширина наиболее яркой части кольца до-



Рис. 171

Кольцо Юпитера (снимок «Вояджера-2»). Кольцо просвещается лучами Солнца и разделяется вблизи внешнего края (на снимке не видно). Очень разреженное кольцо простирается почти до верхней границы облачного слоя Юпитера (снимок разрешения НАСА США)

стигает 800 км. Она окружена зоной более слабого свечения, протянувшейся примерно на 5200 км и заканчивающейся, вероятно, у орбиты XIV спутника. Это кольцо не похоже на мощные кольца Сатурна, состоящие из крупных частиц. Изображение освещенного Солнцем кольца (рис. 171) было получено, когда «Вояджер» находился в тени Юпитера. Кольцо ярче в рассеянном вперед свете (если смотреть в направлении от Солнца), чем в свете рассеянном назад, это указывает на исключительную малость частиц кольца. Возможно, оно простирается почти до Юпитера до слоя дымки в его верхней атмосфере и даже может быть продолжением этого слоя. Вряд ли кольцо реликт древних времен. Оно, по-видимому, непрерывно пополняется частицами межпланетной

пыли (т.е. остатками комет), частицами, выбрасываемыми при ударах метеоритов с больших галилеевых спутников, и (или), возможно, из вулканов Ио.

Орбиты шести внутренних спутников почти круговые и располагаются приблизительно в одной плоскости экваториальной плоскости Юпитера. Каждая последующая орбита лежит в среднем в 1,7 раза дальше предыдущей, т.е. аналогично правилу Тициуса. Бода для планетных орбит (приложение 1) Восемь внешних спутников крошечные (приложение 3), их орбиты образуют две группы по четыре спутника. Первая группа располагается приблизительно в 12 млн. км от Юпитера, движутся они в прямом направлении. Спутники второй группы находятся примерно вдвое дальше, движение их по орбитам обратное. Прогрессивное направление обращения, возможно, предотвращает их утрату под действием возмущений, вызываемых силой гравитации Солнца, так как они удаляются от планеты на расстояние свыше 0,2 а.е., где притяжение Солнца может вдвое превышать притяжение Юпитера. Орбиты их имеют довольно большие эксцентриситеты до 0,4, сильно наклонены к плоскости экватора Юпитера — до более чем 30°, и, конечно, значительно меняются со временем под влиянием притяжения Солнца. Вряд ли они устойчивы в течение длительных по астрономическим масштабам промежутков времени. Внешние спутники темнее, чем считалось первоначально, и, по-видимому, более похожи на темные астероиды, наблюдаемые во внешней части пояса астероидов.

Давно известна замечательная особенность трех внутренних галилеевых спутников Ио, Европы и Ганимеда. Они движутся почти в полном резонансе с периодами обращения соответственно 1,77, 3,55 и 7,16 земных суток, находящимися в соотношении 1:2:4. В небесной механике такое расположение считается устойчивым: взаимные возмущения поддерживают отношение постоянным, хотя вследствие притяжения гравитации периоды могут изменяться. Все внутренние спутники подвергались такому воздействию и постоянно обращены к планете одной и той же стороной. Незадолго до приближения «Вояджера-1» к Юпитеру С. Пил, П. Кассен и Р. Рейнолдс показали, что их взаимные возмущения, главным образом между Ио и Европой, совместно с влиянием экваториального вдутия Юпитера удерживают Ио и Европу на орбитах с эксцентриситетами 0,0043 и 0,011 соответственно. Приливный тепловой эффект пропорционален произведению (эксцентриситет)² × × (плотность)² × (радиус)³ и обратно пропорционален периоду в пятой степени. Поэтому Ио нагревается в 20 раз сильнее, чем Европа. Пил, Кассен и Рейнолдс предсказали, что приливный разогрев Ио должен в 10 раз превосходить разогрев Луны вследствие распада радиоактивных элементов. Разумеется, Ио может испытывать некоторый дополнительный нагрев за счет радиоактивности. Они писали, что «последствия существования большой расплавленной области внутри Ио можно будет заметить на изображениях ее поверхности, переданных «Вояджером-1». Благодаря быстрому развитию современной науки их предсказание сразу же подтвердилось (см. цветные фото III и IV).

«Вояджер-1» открыл на Ио восемь действующих вулканов, шесть из них оставались активными четыре месяца спустя (при пролете «Вояджера-2»). Извержение одного вулкана прекратилось за время между пролетами «Вояджеров», другой не был виден из-за неудачного взаимного расположения спутника и космического аппарата. Вулканические «плюмажи» поднимаются на 70–280 км над поверхностью, что требует скорости выброса 1 км/с. Рассеяние света вперед указывает на то, что эти «плюмажи» состоят из очень мелких частиц, вероятно, двуокиси серы SO_2 , которая была обнаружена в газообразном состоянии в вулканических выбросах с помощью инфракрасного спектрометра, установленного на борту «Вояджера-1». Натрий и водород, как уже упоминалось, присутствуют в окружающем Юпитер торе, располагающемся вдоль орбиты Ио, но водяной пар не был обнаружен ни на Ио, ни в ее окрестностях. Присутствуют также сера и кислород. Наземные наблюдения Ио в инфракрасных лучах указывают на поглощение замерзшей SO_2 , согласующееся с давлением паров 10^{-7} бар при температуре экваториальных областей Ио.

Образование вулканов, вероятно, связано с расплавлением силикатных масс в недрах Ио, содержащих небольшое железное ядро. Это заключение подкрепляется значением средней плотности, которая равна $3,5 \text{ г/см}^3$ — немного больше плотности Луны. Под видимой корой лежит неоднородный подкорковый силикатный слой, который в очень немногих областях малой протяженности выходит на поверхность в виде гор высотой не более 10 км. При температурах, господствующих на умеренных глубинах, возможно расплавление серы (120°C при давлении 40 бар), так что под верхним слоем твердой серы, смешанной с SO_2 , лежит океан расплавленной серы. Плотность серы меньше, чем плотность силикатов, вследствие чего мощные потоки жидкой серы покрывают поверхность и наблюдаются в виде огромных равнин со слабо выраженным рельефом (рис. 172). Количество серы не известно; внешняя кора может быть тонкой и содержать силикаты. Полярные области менее гладкие, чем экваториальные, что согласуется с их более низкой температурой и меньшей текучестью вещества.

Значительная часть тепла, генерируемого приливным трением в Ио, излучается. Кроме того, потоки в расплавленных недрах Ио, так же как и в Земле, создают тепловые очаги, в которых образуются вулканы, однако с тем отличием, что на Ио извергаются сера и SO_2 , а не силикаты и вода, как на Земле. Интенсивные красный, оранжевый, желтый, коричневый, черный и белый цвета на Ио подтверждают изложенные общие представления о ее верхних слоях. Такая окраска типична для серы и соединений, включающих кислород, натрий, калий и водород, а также иней SO_2 . На карту Ио нанесено свыше 300 подобных выходов. Поперечники наибольших составляют 250 км, они располагаются в основном в экваториальных областях, где наблюдается большинство выходов. Их наиболее типичный диаметр равен 40 км.

Ударные кратеры с диаметром, превышающим разрешение изображений (приблизительно 600 м), на Ио не обнаружены. Из этого следует,

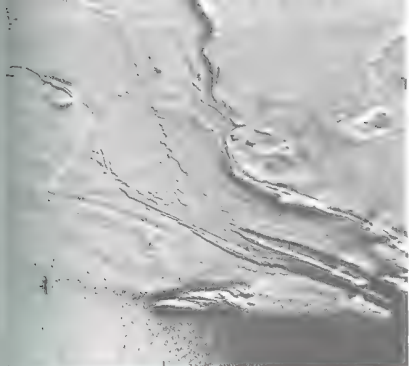


Рис. 172

Участок поверхности Ио, покрытый потоками серы и натрия. Следы трещин и разрывов потоков прослеживаются на протяжении нескольких сотен километров. Из снимку «Вояджера-1» (с разрешением НАСА США)

что скорость отложений на поверхности должна превышать 0,1 мм/год и определяться выбросами, потоками и поверхностной эрозией, связанной с вулканической активностью (рис. 172). Современная скорость отложений, определяемая наблюдаемыми выбросами, оценивается в 0,001 мм/год. Следовательно, возраст свежих разноцветных потоков, вероятно, меньше 1000 лет. В некоторых областях обнаружены изменения, происшедшие за 4 месяца (между пролетами «Вояджеров»). Возраст отдельных образований, кроме редких горных вершин, по оценкам превышает миллион лет.

Современные скорости потерь серы и натрия, переходящих в газовый тор, слишком малы, чтобы заметно истощить ожидаемые на Ио запасы за время существования Солнечной системы. Ясно, что вода утрачена, буквально выкипела в давние времена, так же как и другие летучие вещества, такие, как азот и углерод, столь распространенные на Венере и Земле.



Рис. 173

Типичный участок поверхности Европы. Контрастность снимка сильно увеличена. Снимок «Вояджер 2» (С любезного разрешения НАСА США.)

Изображения, переданные «Вояджером», показали, что Европа, Ганимед и Каллисто совершенно не похожи друг на друга. Поверхность Европы (цветное фото IV и рис. 173) имеет поразительный вид. Это уникальная поверхность в Солнечной системе. Она покрыта лабиринтом запутанных тонких линий и полос, похожих на знаменитые марсианские «каналы». Длина некоторых линий достигает тысяч километров, ширина составляет приблизительно 20-40 км. Вероятно, это большей частью заполненные трещины. Европа — самое гладкое тело в Солнечной системе, самые высокие детали рельефа возвышаются над равнинами всего примерно на 40 м. Она напоминает оранжевый кристаллический шар, довольно сильно истерзаный. Немногочисленные признаки присутствия ударных кратеров указывают на практически полное отсутствие ран, почти мгновенное по астрономической шкале времени. Внешняя кора, должно быть, в основном ледяная до глубины, по-видимому, порядка 100 км. Средняя температура поверхности составляет около 150°С. На экваторе температура в полдень несколько повышается, что согласуется с существованием твердой ледяной поверхности и низким газовым давлением. В инфракрасном спектре Европы преобладают детали, характерные для спектра поглощения воды. Подобно Ио она имеет высокое альbedo, свойственное инею.

Количество тепла, создаваемого приливным трением, близко к 5°, количества, выделяемого в Ио, поэтому недра Европы должны быть горячими, однако не настолько, чтобы потребовался специальный механизм охлаждения, такой, как вулканы. Химический состав недр в основном может быть таким же, как у Ио. Несколько меньшую плотность 3,0 г/см³ (против 3,5 г/см³ у Ио) можно объяснить наличием ледяной или водной коры толщиной 100 км. Внутреннее тепло могло бы уходить через тонкий внешний слой льда, вероятно, 10-километровой толщины. Множество трещин должно быть результатом снятия напряжений, возникающих под поверхностью.

Совсем иной характер имеет поверхность Ганимеда (цветное фото IV и рис. 174) крупнейшего и самого массивного из всех спутников. Его средняя плотность около 1,9 г/см³. Это означает, что он почти наполовину состоит из воды или льда. Ганимед хорошо отражает свет (около 40%), но его поверхность не такая светлая, как у Ио и Европы (их отражательная способность около 70%). Поэтому он теплее, его средняя температура приблизительно — 130°С. Быстрые изменения температуры в ходе затмений показывают, что его поверхностный слой проводит тепло хуже, чем верхний слой Луны, примерно на порядок величины. Д. Моррисон и Д. Крюйкенс считают, что теплоизолирующий слой покрывает свыше 95% поверхности и представляет собой, по-видимому, тонкий слой инея, покрывающего ледяной слой или слой из смеси льда, пыли и обломков скальных пород.

Темные области Ганимеда усеяны кратерами диаметром в несколько десятков километров, но кратеры очень мелкие. Это своеобразная поверхность древней местности, ведущаяся со времен эпохи ранней метеоритной бомбардировки, следы которой мы видим на Луне, Меркурии, Мар-



Фото 1.

[illegible]



Фото 11 Большое Красное пятно на Юпитере. Снимок «Вояджера-1» (С любезного разрешения НАСА США.)



Фото III.

Мозаика юпитерианского спутника Ио, составленная из снимков «Вояджера-1». Темные и пятнистые районы связаны с вулканами, а области без деталей — расположенные между ними равнины. Вверху слева — действующий вулкан на Ио, высота выброса около 210 км (по снимку «Вояджера-1»). Его жерло выглядит черным кольцом в верхней левой части мозаики. (С любезного разрешения НАСА США.)



Фото IV

Четыре галилеевых спутника Юпитера в одном масштабе. Вверху слева — Европа, внизу слева — Ганимед, внизу справа — Каллисто и поблизости — решение НАСА США.

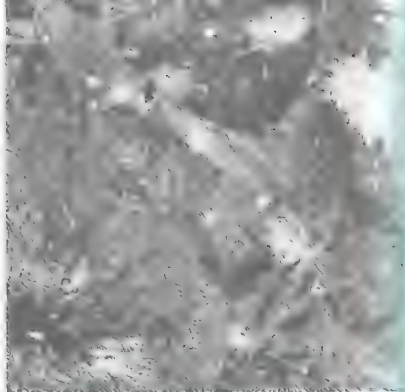


Рис. 174. Крупномасштабное изображение участка Ганимеда (фото, диаметр 15, поперечник 1000 км. С увеличенного разрешения НАСА США.)

се. Но как эти следы могли сохраниться на теле столь малой плотности? На Ганимеде существует огромная система хребтов, возможно, связанная с древним бассейном ударного происхождения на ненаблюдавшейся части спутника.

Самым примечательным свойством поверхности Ганимеда являются пучки длинных параллельных борозд (желобов), некоторые из них длинные и искривленные и по виду похожи на суперавтостреды (рис. 174). Они покрывают значительную часть его площади. Эти уникальные образования объяснить не удалось. Вообще «геология» Ганимеда ставит целый ряд спорных проблем.

Перейдем теперь к Каллисто — самому далекому галилееву спутнику. Мы встречаемся еще с одним уникальным телом (цветное фото IV и рис. 175). Этот третий по размерам спутник в Солнечной системе обладает наименьшей среди крупных спутников плотностью. Поверхность Каллисто на невидимой с Юпитера стороне до предела насыщена кратерами (рис. 175). На обращенной к Юпитеру стороне, условия на-



Рис 175

Изображение планеты Юпитера, полученное с помощью космического аппарата «Вояджер-1», которое показывает предельную насыщенность кратерами по всей поверхности. Оранжевый диск на изображении — это диск Юпитера, который находится в центре изображения. Изображение было получено с помощью телескопа Хаббл в 1996 году. Изображение было получено с помощью телескопа Хаббл в 1996 году. Изображение было получено с помощью телескопа Хаббл в 1996 году.

блюдения которой с «Вояджера-1» были лучше, видна огромная многокольцевая структура с яркой центральной областью поперечником около 300 км. От 8 до 10 кольцевых гребней окружают центр до расстояний примерно 1500 км. Эта структура сходна с меньшими бассейнами на Меркурии (котловина Калорис) и Луне (Океан Бурь). Но на Каллисто не наблюдается признаков, свидетельствующих о подвижности внешней коры. В центральной области этого образования кратеров гораздо меньше, чем на большей части поверхности Каллисто, значит, это образование сравнительно молодое.

Напрашивается вывод, что Каллисто покрыта шрамами от мощной бомбардировки, происходившей 4 млрд. лет назад. Существование большой кольцевой структуры и другой меньших размеров показывает, что в Солнечной системе от Юпитера до Меркурия в бомбардировке участвовали относительно крупные тела, причем многие на поздних стадиях эволюции. Поскольку средняя плотность Каллисто лишь $1,8 \text{ г см}^{-3}$, она должна содержать больше воды, чем Ганимед, но сохранять при слабо выраженном рельефе поверхности древние кратеры. В начале эволюции Солнечной системы на Каллисто уже существовала толстая ледяная кора (вечная мерзлота?), которая быстро заполняла кратерные чаши, что продолжается до сих пор. Низкое альbedo Каллисто (всего 0,2) указывает на примесь в коре пыли. Из-за столь низкой отражательной способности Каллисто — самый теплый галилеев спутник. Температура его поверхности — 120°С или выше. Правда, она слишком низка, чтобы обеспечить образование достаточно мощной атмосферы из водяного пара, которая практически не наблюдается. Среди больших спутников Юпитера Каллисто обладает также поверхностным слоем с наивысшей теплоизолирующей способностью. Она покрыта очень темной пористой коркой толщиной, по видимому, всего лишь несколько миллиметров.

Как мы увидим ниже, исследование галилеевых спутников «Вояджерами» вносит существенный вклад в наши знания об эволюции Солнечной системы. Но уже давно они внесли важный вклад в физику. Датский астроном Оле Рёмер (1644—1710), наблюдая затмения этих спутников Юпитером, открыл, что интервал времени между затмениями больше, когда Земля удаляется от Юпитера, чем когда она приближается к нему. В 1675 г. он пришел к заключению, что эти кажущиеся изменения являются следствием конечности скорости света. Прежде считали, что свет распространяется мгновенно. При удалении Земли от Юпитера свет между затмениями должен пройти более длинный путь, при сближении — более короткий. Рёмер изобрел также несколько инструментов для позиционной астрономии. Значение его трудов для науки было недостаточно оценено при его жизни и только о доказательстве конечности скорости света помнят в наши дни.

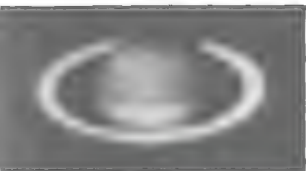
Сатурн, Уран и Нептун

Сатурн

При наблюдениях в телескоп среди несметного числа объектов, вероятно, самый прекрасный планета Сатурн (рис. 11). В вечерние сумерки, пока небо еще светлое, Сатурн выглядит на ярком голубом фоне как желто-золотой шар, а его великолепные кольца воспринимаются как уникальное произведение искусства, а не как явление природы. Слегка размытые полосы на поверхности, более однородные, чем полосы Юпитера, параллельны огромным кольцам. Яркость, высокая в центре, постепенно ослабевает в направлении туманного края диска, а кольца по краям как бы растворяются в небе.

Там, где кольца Сатурна пересекают диск, темная неясная полоса намечает их внутренний край (рис. 176). Это *креповое кольцо* легко обнаруживается по его слабой тени на диске планеты. Внешние кольца также отбрасывают тени на Сатурн, который в свою очередь полностью затмевает значительную часть колец. Полярные области (ось вращения перпендикулярна плоскости колец) темнее, чем другие части края диска, и при хорошем качестве изображения кажутся слегка зеленоватыми. Легко обнаруживаются три основных ярких кольца: яркое среднее кольцо В, более слабое внешнее кольцо А и едва светящееся креповое кольцо С. Два внешних кольца разделены узкими темными щелями, подобными щели (или делению) Кассини, которая разделяет кольца А и В (названной в честь французского астронома Джовани Доменико Кассини, 1625–1712).

После прохождения вблизи Сатурна в 1979 г. космического аппарата «Пионер-11», впервые давшего возможность взглянуть на кольца из-за Сатурна, на просвет, кольца предстали перед астрономами в совсем ином виде. Когда в ноябре 1980 г. «Вояджер-1» передал на Землю теперь уже классическую картину колец (рис. 177), астрономы были поражены в изумление. Освещенные сзади Солнцем знакомые гладкие кольца распадались на множество концентрических узких колец, похожих на звуковые бороздки на грампластинке. Широкую щель Кассини едва удастся различить, так как в ней находятся четыре ярких кольца. Тем не менее, как и ожидалось, щель Кассини пропускает солнечный свет, освещая



1915



1921

Рис 176

Кольца Сатурна — светлые овальные кольца, находящиеся точно в их плоскости. Слева — кольца вблизи максимального раскрытия в 1915 г. Справа — вид колец в 1921 г. с рис. 10. (Фотографии Э. Слайфера, Ловелловская обсерватория)

шающий диск Сатурна между тенями от колец А и В. С этой картины началась новая эра в изучении Сатурна.

Кольца Сатурна лежат точно в экваториальной плоскости планеты, наклоненной на 28° к плоскости земной орбиты (эклиптике). Поскольку положение плоскости колец остается неизменным при движении Сатурна вокруг Солнца, в течение оборота мы видим кольца сверху (с севера), снизу (с юга) и дважды с ребра (рис. 178). Когда кольца наклонены к лучу зрения земного наблюдателя под наибольшим углом, они отражают почти вдвое больше солнечного света, чем сам Сатурн, но если кольца повернуты к наблюдателю ребром, они на короткий промежуток времени почти исчезают. Это означает, что толщина колец исключительно мала. В последние годы кольца были повернуты к нам ребром 27 октября 1979 г., 12 марта и 23 июля 1980 г. В этом столетии они будут опять видны с ребра 21 мая и 11 августа 1995 г. и 11 февраля 1996 г.

Кольца состоят из отдельных частиц, причем каждая частица движется вокруг Сатурна по своей собственной орбите в соответствии с законом всемирного тяготения Ньютона. Неопровержимое доказательство этого факта было получено с помощью спектральных наблюдений. В гл. 11 мы видели, как можно использовать спектрограф для определения химического состава газа по спектральным линиям поглощения. Если газ приближается к наблюдателю, или наблюдатель приближается к газу, то измеренные длины волн становятся короче, чем при наблюдениях в лаборатории, и все линии смещаются к фиолетовому концу спектра. Величина смещения пропорциональна скорости сближения. При удалении все линии смещаются к красному концу спектра. Это явление называется эффектом Доплера. Физик В. акустике аналогичный эффект



Рис 177. Картина сложной системы колец Сатурна, когда Солнце просвечивает сквозь них, по снимкам «Вояджера-1». Главные кольца почти не узнаваемы, за исключением теней на диске Сатурна (Снимок разрешения Лаборатории реактивного движения для НАСА США)

проявляется в уменьшении высоты гудка локомотива, когда он удаляется от вас.

Наклон жирных линий на рис. 179 показывает, что в спектре Сатурна происходит смещение длин волн, а это подтверждает вращение Сатурна и движения в его кольцах. Обратите внимание на противоположный наклон жирных линий, соответствующих диску и кольцам. В каждой точке поперек колец измеренные скорости точно равны скорости спутника, с которой он двигался бы по круговой орбите на данном

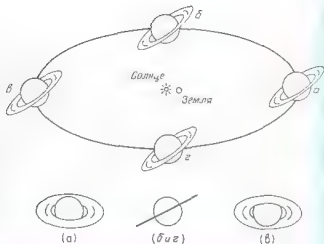


Рис. 178

Изменение вида колец Сатурна при наблюдении с Земли. Положения *а* и *б* соответствуют фотографиям на рис. 176

расстоянии от планеты, т. е. орбитальная скорость уменьшается с удалением от центра. Законы движения планет, найденные Кеплером, выполняются точно. Если бы кольца были сплошными, то внешние края должны были бы двигаться быстрее внутренних. Это доказательство дискретной структуры колец Сатурна было предложено в 1895 г. Дж. Килсром (1857–1900) в обсерватории Аллегени. Разность скоростей поперек колец *А* и *В* составляет около 6 км/с.

Время от времени кольца пересекают направление на какую-нибудь звезду, иногда за кольцами проходят спутники и изредка можно наблюдать некоторые спутники в тени колец. Звезды исчезают, когда закрываются самой плотной частью кольца *В*, вспыхивают почти до нормального блеска в щели Кассини и показывают случайные флуктуации блеска в кольце *А*, которые ныне полностью объясняются присутствием множества отдельных колец, как видно на рис. 177. Немного света все же проходит даже через плотнейшую часть кольца *В* и очень слабо освещает спутники в самой темной части отбрасываемой им тени. Кольца немного краснее солнечного света, самая плотная часть кольца *В* имеет высокое альбедо, 0,70 в видимом свете и 0,57 в синих лучах. Эти наблюдения совместимы с предположением, что частицы колец покрыты льдом или инеем, об этом свидетельствуют и спектральные данные.

Яркость колец очень сильно возрастает, когда они наблюдаются почти точно в противоположном Солнцу направлении. Ф. Франклин находит, что в пределах 1° от противостояния яркость увеличивается более чем на 30% . В 1887 г. Г. фон Зеллигер (1849–1924) предположил, что

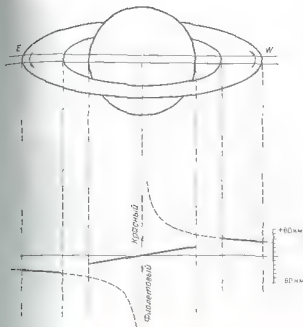


Рис. 179

Вращение Сатурна и его колец. Диаграмма для объяснения смещения линий спектра. Обратите внимание на наклон жирных линий, показывающий, что внешние края колец движутся медленнее, чем внутренние. На вертикальной шкале внизу справа указаны тучевые скорости в км/с (По Дж. Килеру, Йерская обсерватория.)

многочисленные мелкие частицы в кольцах затеняют одна другую, поэтому только в противостоянии частицы видны непосредственно без заметного влияния затенения. Это явление подобно орсолу, который появляется вокруг головы длинной тени человека, падающей на росистую траву ранним утром (рис. 180). На покрытой лиственной растительности при взгляде, близком к направлению, противоположному направлению на Солнце, можно видеть свет, отраженный прямо от всех листьев. Однако при заметных углах к этому направлению свет, проникающий в листву, отражается под разными углами и не попадает к наблюдателю. Наблюдателю, летящему на высотном самолете, тень самолета на земле кажется ярким пятном, на воде она становится темным пятном.

Странный вид колец Сатурна «на просвет» (как на рис. 177) связан еще с одним оптическим явлением. Крупные частицы, размеры которых гораздо больше длины волны света (т.е. много больше 0,5 микрон), отбрасывают тени и рассеивают свет большей частью назад, в направлении источника света. Мелкие частицы, сравнимые по размерам или



Рис. 180

Снимок У. Селтона с ширины 5-метрового рефлектора обсерватории Маунт Патомар. Посмотрите на тень башни и обратите внимание на то, как быстро падает яркость леса от края тени

меньшие длины световых волн, рассеивают свет преимущественно вперед и не отбрасывают резких теней (аналогия: свет фар, падающий на запыленное ветровое стекло). С Земли мы видим свет, рассеянный крупными частицами колец Сатурна. А «Пионер-11» и «Вояджер-1», будучи за Сатурном, принимали свет, рассеянный вперед мелкими частицами, которые становились заметными, когда Солнце находилось за ними, хотя такие частицы не вносят большого вклада ни в массу колец, ни в тени на диске Сатурна. Таким образом, в некоторых из темных колец на рис. 177, так же как в щели Кассини, частицы действительно отсутствуют, тогда как в других высока концентрация крупных частиц, экранирующих солнечный свет. Кольцо С, которое выглядит с Земли смутной тенью, на просвет становится ярким, так как содержит много крошечных частиц. Для полного описания этих сложных кольцевых структур потребуются многочисленные измерения и исследования.

Космические аппараты «Пионер» и «Вояджер» подтвердили существование за яркими кольцами слабого, но широкого кольца Е и щели Энке, отделяющей его от кольца А. Они четко обрисовали «французское» деление между кольцами В и С и самое слабое внутреннее кольцо D. За кольцом А отделенное от него щелью «Пионера-11» находится недавно открытое кольцо F шириной менее 150 км. В промежутке может лежать слабое кольцо G. Широкие темные щели (не все из которых получили официальные названия) обусловлены тем, что периоды обращения в них должны быть кратны периодам спутников Мимас, Энцелад

Деталь	R_c в радиусах Сатурна	Деталь	R_c в радиусах Сатурна
Кольцо С	1,22-1,50	Кольцо А	2,03-2,27
«Французское» деление ($1/3$ периода Мимаса)	1,50-1,53 (1,49)	Деление «Пионера»	2,27-2,33
Кольцо В		Кольцо F	2,33*
Деление Кассини ($1/2$ периода Мимаса)	1,96-2,03	($2/3$ периода Мимаса)	
($1/3$ периода Энцелада)	(1,94)	($1/3$ периода Тефии)	(2,37)
($1/4$ периода Тефии)		Кольцо Е	До 5-6
Деление Энцелада	2,21*	Спутник XI	2,53
($1/5$ периода Мимаса)	(2,21)	($1/2$ периода Энцелада)	(2,51)

* Узкое

* Узкое

и Тефия (табл. 5). Полную теорию о влиянии резонансов на орбиты спутников и частиц колец еще предстоит разработать*

Положение щелей подвержено также гравитационному воздействию экваториального вздутия Сатурна и самих колец, особенно массивного кольца В, обломки которого, возможно, принадлежали к разрушенному (или несформировавшемуся) спутнику диаметром несколько сотен километров. Это предположение справедливо, если типичные частицы имеют диаметры примерно от 1 до 15 м, что согласуется с радиолокационными отражениями, впервые полученными Р Голдстейном, Дж Моррисоном.

Бесчисленное количество узких колец, обнаруженных «Вояджерами» в главных кольцах, обеспечивает «испытательный полигон» для различных теорий. Частицы в кольцах не могут объединиться в крупные спутники, поскольку приливное действие Сатурна разрушило бы их (см с. 274). В то же время внутренние частицы постоянно догоняют и перегоняют более внешние при своем движении по орбитам под действием сил тяготения. Уменьшается ли вероятность столкновений при выстраивании частиц в узкие кольца? Подвержены ли эти узкие кольца воздействию больших неотожествленных масс или спутников? Воздействуют ли на них резонансные возмущения более высоких порядков, связанные со спутниками? Как образовались узкие кольца в темных щелях и почему у нескольких наблюдается заметный эксцентриситет? Как объяснить

* По решению МАС ряду характерных промежутков у внешних красных колец С, В и А дополнительно даны имена Максвелла, Пойгенса и Килера соответственно.—Прим. ред.



Рис. 181

«Переплетенное» кольцо F по снимкам «Вояджера-1» Узлы могут быть «миниспутниками» или концентрациями масс. (С позволения Лаборатории реактивного движения для НАСА США)

«переплетенное» кольцо (рис. 181), в котором три отдельных кольца или потока частиц, по-видимому, переплетаются?

Другая загадка, заданная «Вояджером-1», связана с подтверждением того, что эпизодически наблюдавшиеся радиальные гемные лучи в главных кольцах действительно существуют (рис. 182). Их недопоясность наводит на мысль о крошечных заряженных частицах, увлекаемых магнитным полем Сатурна и движущихся с тем же периодом, что и планета. Частицы, находящиеся в поле одних только гравитационных сил, не способны создавать такие радиальные структуры.

«Вояджеры» открыли еще несколько спутников, но не подтвердили орбиту Януса (спутника X). Все открытые спутники — маленькие, но немало больше самых мелких спутников Юпитера. Два из них движутся по обе стороны от кольца F и имеют вид бесформенных обломков.



Рис. 182

Темные радиальные лучи в кольце В Сатурна. Изображения переданы «Вояджером-1» с интервалом 15 мин. Обратите внимание на смещение лучей, указывающее на период вращения близкий к периоду вращения самого Сатурна. Темные пятна имеют инструментальное происхождение (С любезного разрешения Лаборатории реактивного движения для НАСА США)

Они, как «пастухи», не дают разбежаться «стаду» кольцу. Один из новых спутников вызвал сенсацию: очевидно, он движется по общей с другим спутником орбите, причем периоды обращения обоих спутников равны приблизительно половине периода Энцелада. Диона гравитационно воздействует на малый спутник, движущийся по ее орбите. На крупномасштабных снимках внутренних имеющих названия спутников, за исключением Энцелада, видны обычные следы «оспин» метеоритной бомбардировки и признаки глубоких трещин и долин. На Мимасе (рис. 183) виден огромный кратер на всегда обращенной к Сатурну стороне. Измерения в инфракрасных лучах показали наличие на Энцеладе, Тефии, Дионе и Рее водяного льда. Плотности всех больших спутников, массы которых можно приближенно оценить, заключены между 1,0 и 1,3 г/см³, только у Титана плотность составляет около 2 г/см³. При близком прохождении «Вояджера» около Титана было найдено, что прежние оценки его размеров завышены. Таким образом, спутник Юпитера Ганимед — наибольший и самый массивный спутник в Солнечной системе.

Однако Титан остается уникальным, так как это единственный спутник, обладающий протяженной атмосферой. В 1943–1944 гг. Дж. Койпер нашел в его спектре метан в количестве, примерно в два раза меньшем, чем на Юпитере и Сатурне. «Вояджер-1» сделал поразительное открытие: у Титана есть мощная атмосфера, состоящая пре-

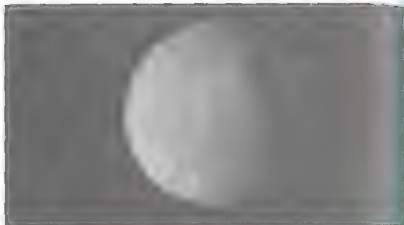


Рис. 183. Спутник Титана, видимый в телескоп. Большая часть, вероятно, покрыта льдом, в результате которого образовался кратер.

1898 г.
1898 г.
1898 г.

имущественно из азота, масса газа, приходящаяся на единицу площади поверхности, вероятно, в 10 раз больше, чем на Земле. Твердую поверхность увидеть не удалось. Выдвигаемые гипотезы весьма разнообразны: от предположения о дождях и океанах из жидкого азота до гораздо менее вероятного предположения о теплой и даже покрытой водой поверхности. Полярные туманные слои, видимые в холодной верхней атмосфере, возможно, состоят из частиц метана или сложных молекул углеводородов. Протяженное водородное облако вокруг Титана можно объяснить диссоциацией метана CH_4 в верхней атмосфере. Облако распространяется далеко как внутрь орбиты Титана, так и за ее пределы, что наблюдалось как «Пионером», так и «Вояджером».

Движение по орбите самого удаленного девятого спутника, Фебы, обратное, радиус орбиты около 13 млн км. Когда она была открыта У. Пиккерингом в 1898 г., это был единственный известный спутник с обратным движением по отношению к планете, но впоследствии были открыты другие спутники с обратным движением.

Япет, шестой спутник, необычен в следующем отношении: его исключительно темное переднее по движению полушарие отражает около 5° падающего света, тогда как противоположное полушарие отражает в 6 раз больше. Япет, подобно Луне и многим другим спутникам, всегда обращен к своей планете одной и той же стороной. Б. Сойфер с коллегами предсказали, а «Вояджер-1» подтвердил, что яркая сторона покрыта в основном льдом, тогда как на темной стороне ледяное

покрытие составляет не более 5°. Не известно, вышло ли на переднюю сторону Япета больше пыли при столкновениях или столкновения с частицами вызвали исчезновение ее ледяного покрова?

Сам Сатурн является уникальным объектом в Солнечной системе благодаря его низкой средней плотности, всего лишь $0,7 \text{ г см}^3$. Подобно Юпитеру Сатурн вращается очень быстро, с периодом чуть больше 10 ч и поэтому заметно сплюснут. Облака на Сатурне гораздо менее заметны, чем на Юпитере. Иногда видны крупномасштабные возмущения, подобные большому белому пятну 1933 г., исчезнувшему год спустя. «Вояджер-1» обнаружил облака различных типов и «красное пятно» размерами с Землю.

Температура в верхней части облаков на 30 С ниже, чем на Юпитере, от -178 до -173 С, но водородно-гелиевая атмосфера простирается выше облаков, почти так же, как у Юпитера, при давлении меньше одной земной атмосферы. Над облаками также наблюдается дымка, которая состоит из частиц, возможно, ледяных, оседающих из колец, или метановых.

По наблюдениям «Пионера-11» ось магнитного поля Сатурна почти точно совпадает с осью вращения в отличие от Земли и Юпитера, у которых эти оси наклонены относительно друг друга. Напряженность магнитного поля на экваторе равна 0,7 напряженности геомагнитного поля, но внутреннее магнитное поле гораздо сильнее из-за больших размеров Сатурна. Согласно теории происхождения магнетизма, токи, генерирующие магнитное поле, располагаются гораздо глубже, чем у Юпитера, но приводят к такой же общей полярности, противоположной по знаку полярности Земли. Кольца поглощают энергичные ионы и электроны магнитосферы Сатурна, о чем свидетельствует резкое прекращение счета заряженных частиц при заходе «Пионера» за край колец. Спутники тоже вырезают в магнитосфере торы. Таким образом, кольца буквально выедают сердцевину радиационных поясов, поэтому магнитосфера не проявляет себя как источник радионизлучения. Совпадение оси вращения и магнитной оси также уменьшает интенсивность радиовсплесков.

С эволюционной точки зрения наибольший интерес представляет наличие внутренних источников энергии. Сатурн излучает в 2,5 раза больше энергии, чем получает от Солнца. Как в случае Юпитера, это избыточное тепло превышает количество энергии, ожидаемое от радиоактивного распада. Сжатие или осаждение вещества к центру также, вероятно, играют роль, однако они не в состоянии обеспечить достаточное количество энергии на протяжении миллиардов лет.

Уран и Нептун

Эти две планеты-гиганта - почти близнецы и находятся во внешних областях Солнечной системы. Их диаметры примерно в 4 раза больше диаметра Земли; Уран, вероятно, на 5° больше Нептуна, хотя измерения несколько неопределенны из-за размытия краев диска. Несмотря на



Рис. 184

Изображение Нептуна в темной инфракрасной области метана. Яркие области представляют высокие облака кристаллического метана. Здесь слой метана над ними тоньше. Снимок сделан со 154-сантиметровым рефлектором обсерватории Кэтиана Арizonского университета (С. Любезного разрешения Б. Смита).

го, Нептун более массивен, его масса достигает 17,3 массы Земли, тогда как масса Урана равна 14,5 земной массы.

Хотя детали поверхности Нептуна (рис. 184) трудно наблюдать из-за его большого удаления, а на Уране можно видеть только слабые полосы, обе планеты безусловно обладают атмосферами, напоминающими атмосферы Юпитера и Сатурна. Их альбедо высоки, в спектрах видны полосы поглощения метана, как у Юпитера и Сатурна, но гораздо более интенсивные. Наблюдательные спектры иллюстрирует рис. 164. Поглощение парами метана в желтых и красных лучах так велико, что при визуальных наблюдениях планеты кажутся сизоватыми, причем этот цвет сильнее выражен у Нептуна. На спектрограммах не видно явных следов аммиака, но водород присутствует.

Отсутствие газообразного аммиака и высокое содержание метана легко объясняются огромными расстояниями этих планет от Солнца и заметным уменьшением количества солнечного тепла, достигающего их поверхности. Поток солнечного излучения на Уране так слаб, что температура его поверхности равна -215°C , а температура Нептуна еще на 2° ниже. Теоретически Нептун, находящийся гораздо дальше от

Солнца, должен быть холоднее на 12°. Очевидно, Нептун обладает внутренними источниками тепла, дающими примерно столько же энергии, сколько ее приходит от Солнца, Уран же таких источников не имеет. Чем объясняется существование внутренних источников тепла у одних планет-гигантов и отсутствие у других планет — пока не ясно. Единственная известная причина продолжающегося в ходе эволюции гравитационное сжатие. Но почему Нептун сжимается, а Уран нет?

Возрастающая интенсивность поглощения метаном и ослабление поглощения аммиаком от Юпитера к Нептуну (рис. 164) несомненно являются следствием падения температуры. Чем меньше температура, тем меньше давление паров аммиака, следовательно в атмосфере Нептуна должно остаться очень мало газообразного аммиака, а метан будет вымерзать там при довольно высоких давлениях. На рис. 184 приведена фотография Нептуна в инфракрасных лучах, полученная в слабом свете центральной части полосы поглощения метана. Экваториальные области темнее высокоширотных областей, а это означает, что на экваторе мы глубже проникнем в метановую атмосферу. Следовательно, высота облаков меньше в районе экватора, чем у Юпитера, и они, вероятно, состоят из частиц метана, так же, как и облака на Уране.

Внутреннее тепло даже у Нептуна всего в несколько раз больше, чем у Земли, так что перенос тепла к видимой поверхности и его излучение в пространство на Уране и Нептуне не связаны с какими-то дополнительными проблемами. Поэтому их облачные системы крайне слабы по сравнению с системами Юпитера и Сатурна и едва ли будут доступны наблюдениям с Земли. Здесь не обойтись без помощи космических аппаратов или космических телескопов. На Нептуне может существовать дымка, которая скрывает более низкие облака. По видимому, у него потемнение к краю диска слабее, чем у Урана.

Периоды вращения подлежат уточнению, определения были сделаны по доплеровским смещениям спектральных линий, по фотометрическим наблюдениям и путем вычислений на основе трудных измерений сжатия. Уран, вероятно, вращается с периодом около 16 ч вокруг оси, наклоненной под углом 98° к его орбитальной плоскости. Пять его спутников движутся приблизительно в одной плоскости, а это довольно убедительно свидетельствует о перпендикулярности его оси вращения этой плоскости. Период вращения Нептуна, вероятно, близок к периоду вращения Урана и заключен в пределах от 11 до 19 ч. Обе планеты не показывают признаков сильного магнитного поля, хотя У. Браун зарегистрировал радиопульсы от Урана на волне около 600 м.

Кольца Урана

Открытие колец Урана — это пример сюрприза, который преподнесла нам природа при осуществлении других довольно прозаических проектов. В данном случае задача состояла в более точном измерении диаметра Урана и изучении его верхней атмосферы по наблюдениям покры-

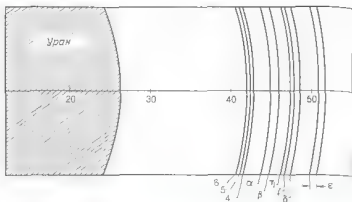


Рис 185

риальную плоскость. Из пяти колец только кольцо ϵ имеет заметную ширину.

гния звезды 9-й звездной величины 10 марта 1977 г. Дж. Эллиот, Д. Динхем и Д. Минк совершали полет на борту Койперовской самолетной обсерватории (КАО) из Перта (Австралия), чтобы наблюдать покрытие при идеальных условиях на высоте 12,5 км. Ожидалось, что покрытие будет видно южнее Перта, поэтому самолет летел к 52 ю ш над южной частью Тихого океана. К счастью, телескоп был наведен на звезду и фотометрическое оборудование было включено на три четверти часа раньше предсказанного момента покрытия. Почти немедленно фотометр зарегистрировал резкое и сильное ослабление блеска звезды. Уж не новый ли это спутник Урана? Ослабление блеска повторялось пять раз до покрытия звезды, начавшегося почти через 5 мин после этого. Такой неожиданный результат вызвал всеобщее возбуждение. Наконец, 12 метровая лента с записью была обработана и оказалось, что пять ослаблений блеска звезды до покрытия сопровождались пятью точно такими же ослаблениями блеска после покрытия в моменты, эквивалентные точно таким же расстояниям от Урана в плоскости орбит его спутников. Были открыты четыре почти круговых кольца (α , β , γ , δ) и одно (ϵ) слегка эксцентричное! Наблюдения, выполненные четырьмя другими группами ученых, подтвердили это открытие.

В настоящее время отождествлены девять таких колец, расположенных на расстояниях от 41 000 до 52 000 км от центра Урана, т. е. на расстоянии менее радиуса планеты от поверхности (рис. 185). Семь из них крайне узкие, 0,5 км шириной, и очень непрозрачные. Кольцо β шире — около 12 км, а самое внешнее, кольцо ϵ , совершенно отлично от остальных. Его ширина, заключенная в пределах от 20 до 100 км, переменна и линейно зависит от расстояния от Урана, но судя по пропусканию света (10–60%), суммарная площадь затмевающих частей почти постоянна вдоль кольца.

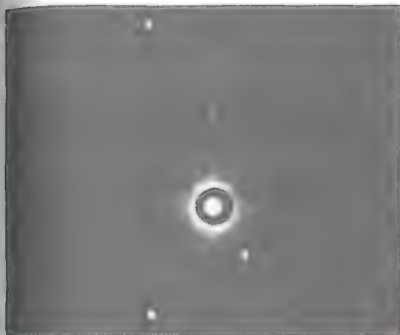


Рис. 186

— (внутренней) и его пять спутников: Умбриэль, Миранда (очень светлое), Ариэль и Титания (Фото Морской обсерватории)

Очевидно, это эксцентричное кольцо прецессирует как целое (как если бы оно было твердым телом) вокруг Урана с периодом около 8 или 9 месяцев, прецессия вызывается экваториальным вздутием Урана. Период обращения частиц в кольце ϵ равен 0,354 дня, период обращения внутреннего спутника Миранда почти точно в 4 раза больше этого значения 1,414 сут. Период кольца ϵ находится также в резонансе 1:7 с периодом обращения второго спутника Ариэль. Кольца δ , α , γ и ϵ все могут находиться в резонансе с этими двумя внутренними спутниками. Резонансы для других колец еще не установлены так же надежно. Возможно, они связаны с более мелкими, еще не открытыми спутниками.

Все пять спутников Урана малы и до сих пор трудны для наблюдений (рис. 186, приложение 3). Их орбиты лежат почти в одной плоскости, наклоненной к плоскости орбиты Урана на 98°, вероятно, определяющей экватор планеты. Лучше, чем прямые наблюдения. Их массы оцениваются по взаимным возмущениям очень приблизительно, а радиусы известны так плохо, что определять их плотность просто не имеет смысла.



Рис. 187 Джерард П. Койпер (1906-1973), ученый, внесший значительный вклад в изучение Солнечной системы: открыл Миранду, спутник Урана и Нереиду — спутник Нептуна

Спутник Нептуна Тритон — один из самых крупных спутников в Солнечной системе. Он значительно больше Луны, и его масса составляет около 1,9 лунной массы. Таким образом, плотность, определенная не очень надежно, возможно, заключена в пределах $1,5-3,0 \text{ г/см}^3$. Тритон обладает крайне незначительной метановой атмосферой, его поверхность каменная, не ледяная. Нереида — маленький спутник, и сведений о нем очень мало (рис. 187). Однако орбиты обоих спутников сильно различаются. Тритон обращается по орбите, наклоненной к экваториальной плоскости Нептуна на 28° , на расстоянии от него 356 000 км, движение Тритона обратное; Нереида движется в прямом направлении, на значительно большем расстоянии — около 5 570 000 км. Таким образом, Тритон является единственным в Солнечной системе внутренним спутником, имеющим обратное движение. Поэтому приливное трение, вызываемое Нептуном, может поставить его в опасное положение. Т. Мак-Корд указывает, что Тритон, двигаясь по спирали, может разрушиться в течение 10-100 млн. лет.

На планетах-гигантах, несмотря на (или вследствие) их огромные размеры, так же как и на их спутниках, за исключением, быть может, Титана, нет условий для существования жизни типа земной.

Сравнение планет и спутников

Наблюдения звездообразования в темных газо-пылевых облаках межзвездного пространства убедительно свидетельствуют о том, что *Солнце и его планетная система возникли в результате сжатия части такого облака под влиянием сил гравитации, в соответствии с гипотезой Иммануила Канта, выдвинутой в 1755 г.* Вероятно, наша планетная система была одной из многих появившихся на свет в звездном инкубаторе вместе со звездами-гигантами. Их рождение было стимулировано вспышкой сверхновой звезды. Тела Солнечной системы образовались из того же первичного вещества, что и Солнце. Нам известны химический состав Солнца и метеоритов, многое известно о химическом составе Земли и поверхностных слоев Луны. Мы много знаем о массах, плотностях и других физических характеристиках большинства планет и нескольких спутников. Сопоставляя все эти сведения с известными физическими законами, можно сделать некоторые выводы о химическом составе и внутреннем строении планет и спутников.

Образно говоря, мы расшифровали часть грандиозного рецепта, по которому природа «изготавливает» планеты и спутники. Известны основные ингредиенты, их пропорции в различных объектах и их распределение внутри тел. Это и есть *сравнительная планетология* — предмет данной главы. «Способ приготовления»: перемешивание, «разделывание», температура и продолжительность «выпечки», охлаждение, «приправы» и общий расчет затрат времени на все процессы: остается неопределенным и умозрительным. Это тема следующей главы об эволюции Солнечной системы.

Даже недра Земли на глубинах свыше 0,001–0,002 ее радиуса недоступны изучению прямыми методами. Мы вынуждены сопоставлять данные наблюдений и теоретические расчеты, чтобы составить представление о внутреннем строении планеты или спутника. Для этого используются три вида информации: 1) основные физические свойства, найденные из прямых наблюдений или гравитационных возмущений, 2) возможный химический состав, выведенный из содержания элементов на Солнце; 3) химические и физические свойства веществ, из которых

состоят разные тела, в частности при высоких давлениях и температурах.

В настоящее время известны формы, размеры, массы, средние плотности и свойства поверхности восьми планет и по крайней мере шести больших спутников. В гл. 6 было описано, как с помощью сейсмометров регистрируются сейсмические волны от землетрясений, дающие ценные сведения о недрах Земли. Подобным образом лунотрясения поведали нам о строении лунных недр. К сожалению, мы пока не располагаем сейсмическими данными о других небесных телах. На Марсе работал только один малочувствительный сейсмограф, не зарегистрировавший ни одного марсотрясения. По крайней мере можно сказать, что сильные марсотрясения очень редки.

Из полярного сжатия быстровращающихся планет также можно извлечь важную информацию об их внутреннем строении. Экваториальное вздутие по-разному возмущает движение близких спутников и проходящих вблизи космических аппаратов и далеких тел. В гл. 7 было описано, как солнечное и тунное притяжение экваториального вздутия Земли вызывает прецессию земной оси. Такие гравитационные эффекты, обусловленные экваториальным вздутием, позволяют измерить плотность верхних слоев планеты и затем сравнить ее со средней плотностью планеты в целом. Эти данные дополняют сведения о моменте инерции тела, величине, показывающей, какая сила требуется, чтобы заставить его вращаться или замедлить вращение. Эта важная величина известна для Земли, Луны, Марса, Юпитера и Сатурна, плохо определена для Урана и Нептуна и совсем не известна для Меркурия и Венеры из-за их медленного вращения.

Существование или отсутствие магнитного поля — также важный фактор. Наличие сильных магнитных полей у Земли, Юпитера и Сатурна свидетельствует о горячих расплавленных недрах и конвекционных течениях. О внутреннем строении можно судить и по деталям поверхности, таким как вулканы, свежие или старые кратеры, и особенно по общей топографии. Например, природа большого поднятия Фарсида на Марсе и общий уровень поверхности планеты вместе с данными о кратерах указывают на ограниченный характер или, возможно, единственный период циркуляции, т. е. на слабую тектонику плит на Марсе. Напротив, слабый рельеф поверхности Европы свидетельствует о быстрой перестройке коры в результате перетекания льда в верхних слоях. Атмосферы, картина циркуляции в них и свидетельства существования внутренних тепловых источников также обеспечивают нас очень важной информацией.

Гравиметрические измерения на поверхности Земли дают представление о толщине и плотности верхних слоев земной коры. В основном такую же информацию для Луны дают выведенные на окололунные орбиты искусственные спутники. Искусственные спутники позволяют многое узнать о Марсе. В конечном счете можно ожидать, что дальнейшие космические исследования обеспечат нас такими данными для всех планет и больших спутников.

Тепло, выделяющееся при распаде радиоактивных элементов, может привести к плавлению вещества в недрах и, следовательно, оказывать сильное влияние на внутреннее строение. Поэтому современное состояние недр отражает их тепловую историю, которую надо учитывать при расчетах. Отсутствие признаков нагревания также ценный факт. К счастью, нам известен характерный возраст Солнечной системы 4,6 млрд. лет, а это значительно облегчает расчеты количества тепла, выделившегося при распаде известных долгоживущих изотопов радиоактивных элементов. Однако следует учитывать возможность того, что на ранних стадиях существовали короткоживущие элементы, также внесшие свой вклад в тепловую историю.

Из каких же веществ состоят планеты и спутники и каковы их некоторые свойства? Вещество Солнца довольно хорошо перемешано, за исключением, вероятно, области около самого центра. Теоретические модели Солнца дают более точные значения для содержаний водорода и гелия, а спектральные наблюдения нижних слоев атмосферы дают надежные сведения об относительном содержании других элементов. Принято делить элементы на три группы: 1) газовый компонент, водород, гелий и благородные газы; 2) ледяной компонент, углерод, азот, кислород и некоторое количество водорода; 3) тяжелый, или скальный, компонент, кремний, железо и все прочие элементы. Основание для такого разделения, конечно, температура. При очень высоких температурах, таких, как на Солнце, все вещества находятся в газообразном состоянии. В условиях слабой и умеренной гравитации при температурах от 700°С до комнатной температуры скальный компонент будет твердым в соединении с заметной долей кислорода, а углерод, азот, кислород и водород будут находиться в газообразном состоянии. При низких температурах все вещества, кроме водорода, гелия и благородных, или инертных, газов, находятся в твердом состоянии. Такое разделение основных веществ имеет фундаментальное значение для понимания эволюции планет.

Оказывается, только очень малая доля основных веществ пригодна для образования планет земной группы. Скальный компонент составляет всего 0,4-0,5% от полного количества вещества, или от 1/200 до 1/250. Ледяного компонента несколько больше, 1,8%, так что на долю комет, планет и спутников, состоящих из смеси льда и камня, приходится 2,2%, или 1/50, полного количества вещества. Для удобства разобьем скальный компонент на несколько подклассов минералов, которые играют важную роль в образовании планет типа Земли, астероидов и метеоритов. Достаточно сказать, что железо по массе составляет примерно треть каменистого компонента, еще треть приходится на долю кремния, магния и серы. Если принять, что для атомов этих элементов типично соединение с двумя атомами кислорода при образовании минералов, то потенциальный скальный компонент возрастет на 0,7%, или 1/140, от полного количества вещества. Около 10% этого количества приходится на долю двуокиси серы, которая, как мы видели в случае Ио, иногда проявляет себя как летучее вещество.

Физические законы для газов в звездных недрах, находящихся при очень высоких температурах и высоких давлениях, известны лучше, чем для вещества при низких температурах, характерных для планет, поскольку они проще, чем для жидкостей и твердых тел. Давление в земном ядре составляет миллионы атмосфер, что не достижимо в лаборатории, а температуры несколько тысяч градусов. Дополнительные трудности в расчетах внутреннего строения Земли сопряжены с различной сжимаемостью разных минералов. В планетах-гигантах давление и температура еще больше. Ожидается, что давление в твердом ядре Юпитера составляет около 300 млн. атм. при температуре около $30\,000^{\circ}\text{C}$. Теоретически хорошо известны свойства водорода H_2 — главного компонента большей части Юпитера, вероятно, до глубины 25 000 км. При еще более высоком давлении водород переходит в жидкое состояние, а затем в металлическое, называемое так потому что в этой фазе в нем имеются свободные электроны, как в металлах, и он хорошо проводит электрический ток. Теория металлического водорода, гелия и других веществ при больших давлениях и высокой температуре непрерывно совершенствуется, так что последующие «модели» внутреннего строения планет и спутников со временем становятся все точнее.

Планеты

Планеты земной группы состоят из скального компонента (рис. 188). Меркурий содержит много железа, поэтому доля кислорода по массе, входящего в состав минералов, относительно мала. Земля и Венера, по-видимому, содержат связанный кислород в значительных количествах, также как и Марс. Изменение химического состава с удалением от Солнца указывает на падение температуры или потерю Меркурием, близким к Солнцу, значительной части элементов, более легких чем железо.

Для планет-гигантов картина совершенно иная (рис. 189). Огромный Юпитер в основном состоит из газа и по химическому составу близок к Солнцу. Юпитер обладает почти максимальными размерами для «холодной» планеты (рис. 190), не имеющей мощных внутренних источников энергии. Если увеличить его массу, то это приведет к возрастанию силы гравитации с последующим сжатием и уменьшением диаметра. В случае несколько меньшей массы размеры планеты были бы ненамного больше, если только не будет подведено больше тепла. Заметим, что масса Сатурна, размеры которого почти такие же, как Юпитера, в три с лишним раза меньше массы Юпитера, и средняя плотность Сатурна вдвое ниже.

Находящиеся еще дальше от Солнца, Уран и Нептун значительно менее массивны, более плотны и имеют гораздо меньшие размеры. Примечательно, что абсолютное содержание ледяного и скального компонентов, грубо говоря, одинаково во всех четырех гигантах. Современная теория еще не способна дать очень точный химический состав в центре Юпитера, но максимальное содержание элементов тяжелее ге-

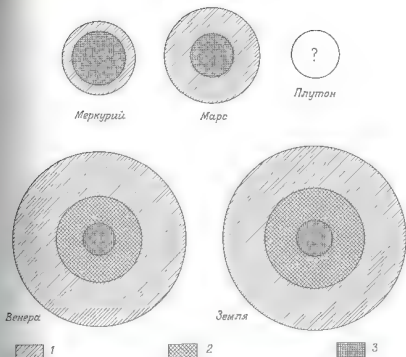


Рис. 188

Внутреннее строение планет земной группы. Модель Венеры, Юпитера, модели Земли. Модель Меркурия приведена по Н. Нельсону, а модель Марса усреднена из многих моделей. 1 — скальный компонент, 2 — расплав, 3 — железо с возможными примесями.

для по оценкам разных исследователей, как правило, не превышает 30-50 масс Земли. Более поздние оценки лежат в пределах от 15 до 20 земных масс, что хорошо согласуется со значениями для других трех гигантов.

Как мы видели выше, в Солнце на долю ледяного и скального компонентов («кометная» фракция) приходится всего около 2%. Таким образом, первоначальная масса, из которой выделилась каждая планета-гигант, более или менее близка к одной массе Юпитера. Тем не менее Нептун состоит из кометного вещества примерно на 94%, а Уран — примерно на 89%. Полный сценарий происхождения планет-гигантов очевиден. Уран и Нептун должны были образоваться из веществ кометного типа с небольшой добавкой газа. Юпитер и Сатурн конденсировались из первичной протосолнечной смеси элементов с добавлением не-

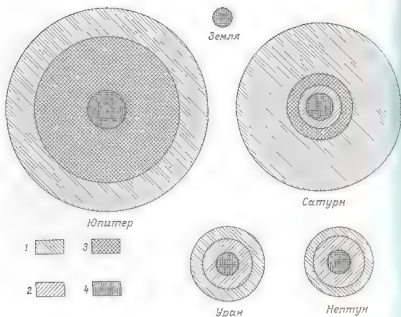


Рис. 189.

Внутреннее строение планет-гигантов. Природа ядра Юпитера еще плохо известна. Здесь она представлена как смесь элементов и скальных компонентов при незначительном вкладе водорода. Строение Юпитера и Сатурна приведено по моделям М. Полака и А. Г. У. Камерона. Уран и Нептун по В. Адольфу и Дж. Мак-Фарленду: 1 — водород и гелий, 2 — жидкий компонент (расплавленные металлы), 3 — металлический водород, 4 — скальные компоненты и металлы (расплавленные).

которого количества космического вещества. Вряд ли верна альтернативная теория, согласно которой Уран и Нептун когда-то были сравнимы с Юпитером или Сатурном, а затем потеряли газовую составляющую. На таких больших расстояниях от Солнца подходящие механизмы потери неясны.

С другой стороны, из скального состава планет земной группы следуют два диаметрально противоположных способа их образования. Характерная доля первичной протосолнечной смеси элементов в них, вероятно, составляет одну четверть по сравнению с характерной долей для планет-гигантов. Они могли возникнуть из чисто скального компонента при температуре, близкой к «комнатной». Альтернативная гипотеза — они могут быть остатками ядер больших протопланет солнечного состава. Эти противоположные возможности обсуждаются в следующей главе.

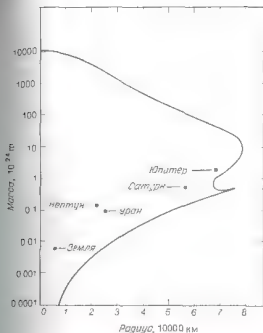


Рис. 190

График зависимости массы планет и спутников от радиуса в сравнении с теоретическими зависимостями для Земли и планет-гигантов (по У. Дэй, М. С. Кэп).

Спутники

Крупные спутники планет (рис. 191) состоят только из вещества кометного типа, от чисто скального до скально-ледяного. По своему химическому составу Луна до некоторой степени похожа на верхнюю мантию Земли, вероятно, с относительным недостатком железа. Полное отсутствие воды и легких элементов указывает на значительный нагрев Луны и потерю летучих. Согласно современным представлениям, Луна на ранних стадиях эволюции была холодной. Вследствие распада радиоактивных элементов нагревались недра, тогда как верхние слои нагревались вследствие аккреционной бомбардировки, возможно, совместно с электромагнитным нагревом под действием сильного солнечного ветра на ранних стадиях эволюции Солнца. Очевидно, что во время мощной бомбардировки около 4 млрд. лет назад Луна расширялась; об этом свидетельствует огромное число радиальных трещин, исходящих из Моря Дождей.

Меркурий, наоборот, вероятно, сжимался, что, по-видимому, приве-

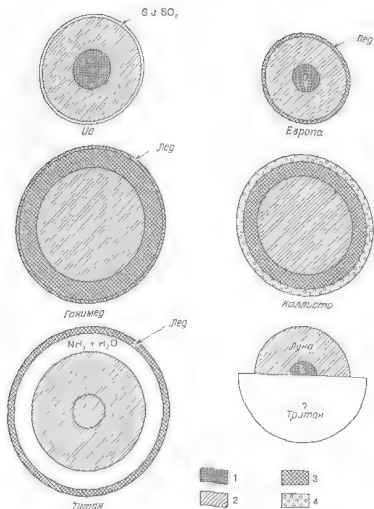


Рис. 191 Внутреннее строение самых крупных спутников. Ядро и скальный компонент в нем, а также расплавленный лед, по Г. Джонсону. Титан по Дж. Льюису и Д. Хантеру. 1 — расплавленная область, 2 — скальный компонент, 3 — вода или лед, 4 — смесь ледяного и скального компонентов

ло к образованию большой котловины Калорис. Различный ход эволюции этих двух тел может быть связан с содержанием радиоактивных элементов. Они имеют тенденцию при химическом разделении связываться с минералами земной мантии и не оседают с железом к центру Земли. Поэтому вполне возможно, что содержание радиоактивных элементов на Меркурии ниже, чем на Земле.

В настоящее время интенсивно исследуется история галилеевых спутников Юпитера. На рис. 191 мы видим последовательное уменьшение плотности с увеличением радиуса орбиты. Очевидно, Ганимед и Каллисто имеют в основном кометный состав с более низкой долей ледяного компонента. С другой стороны, Ио и Европа по общей структуре очень похожи на Луну. В гл. 12 мы подробно останавливались на разогреве Ио под действием приливного трения, вызываемого другими спутниками и экваториальным вздутием Юпитера, гравитационные возмущения которых вынуждают Ио двигаться вокруг Юпитера по эксцентрической орбите. Приливный разогрев загущивает раннюю историю Ио, поскольку ледяной компонент, вероятно, был потерян, даже если Ио первоначально полностью имела кометный состав. Небольшой разогрев предсказывается и для Европы.

Итак, возможны по крайней мере три сценария образования и эволюции галилеевых спутников. Два из них включают рост в туманности кометного состава, вращавшейся вокруг Юпитера. Согласно одному из них, при слипании вещества примерно сохраняется кометный состав, но внутренний спутник нагревается вследствие приливного трения сильнее, чем внешние, и в результате теряет ледяной компонент. Согласно другому сценарию, чем меньше расстояние от Юпитера, тем выше температура, поэтому ледяному компоненту не удалось накопиться на Ио, но его все больше в последовательности Европа, Ганимед, Каллисто. Третий сценарий предполагает, что все спутники были захвачены в протяженную атмосферу Юпитера или в туманность.

О мелких спутниках больших планет известно так мало, что пока еще рано говорить о том, были ли они захвачены или сформировались *in situ*. Для многих или большинства из них захват кажется более вероятным.

Титан (спутник Сатурна) и Тритон (спутник Нептуна) наблюдались недостаточно, поэтому еще рано делать какие-либо выводы. Наиболее вероятно их происхождение из туманности кометного состава, но обратное движение Тритона по близкой к Нептуну орбите является уникальным явлением. На захват Нереиды указывает ее прямое орбитальное движение по далекой от планеты орбите. Верно ли, что Плутон — потерянный спутник Нептуна, а Тритон — задержанный «нарушитель границы»?

Случайным захватом довольно трудно объяснить происхождение Деймоса и Фобоса. В небесной механике захват небольшими планетами встречается с серьезными трудностями. Другие гипотезы: столкновение астероидов вблизи планеты или образование спутника из вещества окружавшего планету кольца.

Кольца

Открытие в космическую эру колец Юпитера и Урана заставило задуматься теоретиков. В 1848 г. французский астроном Э. Рош доказал, что жидкий спутник, т.е. тело, связанное только собственными силами гравитации, будет разорван, если он будет двигаться по орбите, мень-

шей $2.41(\rho_p/\rho)^{1/3}$ радиуса планеты, где ρ плотность тела и ρ_p плотность планеты. Малых жидких тел не существует, но каменные тела становятся структурно слабее с увеличением размеров. В результате дробления и размельчения астероиды, например, становятся более похожими на жидкость, чем на твердое тело, подвергающееся приливной деформации. Из табл. 5 видно, что главные кольца Сатурна находятся внутри предела Роша, а аппарат «Пионер-11» чуть дальше этого предела. Для тела плотностью 1.3 г/см^3 предел Роша равен 20 радиусам Сатурна, значит «Пионер-11» пролетел в безопасной зоне и не был разрушен.

Слипание мелких частиц в более крупные тела на расстояниях, сравнимых с пределом Роша, невозможно. Разрушение спутников вследствие столкновений может произойти на любом расстоянии от планеты. Так, вероятно, образовалось кольцо Сатурна.

Судя по огромной массе больших колец Сатурна, это очень старые образования, вероятно, остатки несформировавшихся или разрушившихся спутников. Несомненно, они медленно теряют свое вещество. Вследствие столкновений и разрушения, а также под действием различных сил торможения частицы постепенно оседают на Сатурн, в то же время кольца растут за счет межпланетных частиц и газа, встречающихся на их пути. Это явление может вполне объяснить происхождение ледяного покрытия частиц. Конечно, их стабильность и возраст не могут быть определены ни из наблюдений, ни из современной теории.

Многочисленные узкие и плотные кольца Урана представляют новое явление. Теории выдвигаются, разрабатываются и опровергаются с пылом быстро. Наиболее загадочной проблемой является экцентриситет кольца и связь его ширины с радиальным расстоянием от Урана. П. Голдрейх и С. Трименн пришли к заключению, что такая конфигурация кольца возникла только под действием его собственной гравитации. Для этого требуется поверхностная плотность около 25 г/см^2 , тогда полная масса составит около $5 \cdot 10^{18} \text{ г}$. При плотности 2 г/см^3 вся масса поместится в сфере диаметром 8,4 км, т. е. требование оказывается вполне разумным.

Небесомеханические модели образования и устойчивости колец слишком сложны для описания в этой книге. Кольца Урана простоят до предела Роша при плотности составляющих тел 2.2 г/см^3 , что совместимо с медленным распадом рыхлых тел и неблагоприятно для слипания частиц. Таким образом, каждое кольцо, возможно, представляет остатки разрушившегося небольшого спутника, удерживаемые на орбите одним или несколькими крупными фрагментами. Возможно также, что силы гравитации несблюдаемых мелких спутников, обращающихся между кольцами, препятствуют раслету частиц.

В заключение заметим, что кольца могут быть постоянно обновляющимися образованиями: вещество из них непрерывно диссипирует и замещается новым. Мы уже обращали внимание на совершенно специфический характер вновь открытого кольца Юпитера, в котором частицы имеют микроскопические размеры и, вероятно, часто заменяются. Кол-

по может быть даже продолжением внешней атмосферы Юпитера.

Некоторые астрономы сейчас придерживаются мнения, что у любой планеты могут образоваться кольца хотя бы на короткое по астрономическим масштабам время. Дж О'Киф предполагает, что у Земли тоже было кольцо около 34 млн лет назад. Такое кольцо, затеняя Землю, понизило зимние температуры на 20°C на 1-2 млн. лет, обусловив завершение эоценового отдела геологической истории. Источником кольца он считает извержения лунных вулканов. Он исходит из факта выпадения по всему земному шару тектитов — небольших оплавленных стеклянных шариков, которые где-то расплавились, затем остыли и вошли в земную атмосферу с небольшими скоростями. Однако более правдоподобным объяснением этого и других резких переходов в геологической истории представляется столкновение небольшого астероида с Землей.

Происхождение и эволюция Солнечной системы

Решить основные проблемы происхождения и эволюции Солнечной системы не так-то просто. Удовлетворительная теория должна объяснить огромную массу наблюдаемых фактов и не должна противоречить законам динамики и современной физики. Все гипотезы, выдвинутые до сих пор, были опровергнуты или остались недоказанными при строгом применении физической теории. Современное наступление на проблему идет менее прямым путем, чем прежние методы, опиравшиеся на всеобъемлющие гипотезы. Новый метод приносит плоды не так быстро, но он гораздо более надежен. Путем непосредственного изучения фактов можно определять физические условия, в которых развивались планеты, во все более сужающихся рамках. В конце концов механизм их происхождения станет ясен.

Интересно отметить, что современная наука определила возраст Земли, хотя детали ее происхождения окутаны мраком неизвестности. Древнейшие породы земной коры затвердели 4 млрд. лет назад, а сама Земля образовалась 4,6 млрд. лет назад. Измерение времени, прошедшего с тех пор, как Земля остыла, основывается на незначительных следах свинца, гелия и других элементов, оставшихся в породах после распада радиоактивных элементов (табл. 2 в т. 6). Изучение метеоритов и образцов лунного грунта показывает, что их возраст в твердом состоянии не превышает возраста Земли. Поскольку метеориты — это составляющая Солнечной системы, можно сделать вывод, что вся Солнечная система имеет такой же возраст. Поэтому изучение происхождения Земли равносильно изучению происхождения всей Солнечной системы. 4,6 млрд. лет назад произошло какое-то событие, в результате которого образовались планетные тела и установились закономерности, наблюдаемые сегодня.

К сожалению, мы не можем определить возраст Солнца с такой же точностью, как возраст Земли, Луны и метеоритов. Возможно, Солнце старше своей планетной системы. Поэтому не исключено, что планеты образовались позднее из межзвездного вещества или из газов, выброшенных Солнцем или проходившей мимо звездой.

В планетных движениях существуют определенные закономерности. Все члены Солнечной системы обращаются вокруг Солнца в одном направлении и почти в одной плоскости. В этой плоскости лежат орбиты не только планет и астероидов, но и подавляющего большинства спутников. Кроме того, Солнце и шесть из девяти планет вращаются в одинаковом направлении. Даже кольцо Сатурна участвует в общем движении. Немногие исключения — система Урана, Венера, спутник Нептуна Тритон и некоторые из внешних спутников Юпитера и Сатурна. Вероятно, большой наклон имеет ось Плутона.

Общее движение такого большого числа тел указывает на то, что Солнечная система когда-то была приведена во вращение каким-то единым космическим механизмом. Момент количества движения во внешних областях системы столь велик, что прежние эволюционные гипотезы терпели неудачу в одном отношении. Они были не в состоянии объяснить малый момент количества движения Солнца по сравнению с моментами количества движения больших планет. Момент количества движения планеты, движущейся на данном расстоянии от Солнца (находящегося практически в центре масс Солнечной системы), равен произведению ее массы, расстояния и скорости. Поскольку скорость уменьшается пропорционально квадратному корню из расстояния, одна и та же масса вносит больший вклад в момент количества движения на большем расстоянии от Солнца. Для планеты, движущейся по эллиптической орбите, закон площадей Кеплера (гл. 2) выражает постоянство момента количества движения. Чем ближе планета к Солнцу, тем быстрее она движется. Никакие силы, постоянно действующие в направлении к Солнцу или от него, не способны изменить момент количества движения планеты. Только внешний толчок или торможение вдоль касательной к орбите могут увеличить или уменьшить этот фундаментальный параметр — момент количества движения.

На долю Юпитера с его огромной массой приходится около 60% полного момента количества движения Солнечной системы. Четыре планеты-гиганта обеспечивают свыше 99% полного момента количества движения, а на долю планет земной группы приходится всего 0,2%. Солнце, масса которого в тысячу раз превышает массу Юпитера, вращается так медленно, что его собственный момент количества движения составляет всего 0,5%, от полного. Если все планеты перенести на Солнце вместе с их современными моментами количества движения, то период вращения Солнца уменьшился бы от примерно месяца до 10 ч.

Удовлетворительная теория происхождения Солнечной системы прежде всего должна учитывать существование планет, спутников, астероидов и комет. Она должна объяснить законы движения планет и наблюдаемое распределение момента количества движения. Теория должна быть достаточно гибкой, чтобы объяснить большой объем разнообразных данных, собранных о телах Солнечной системы. Наконец, она должна обеспечить возможность их развития, чтобы позволить объяснить многочисленные изменения, которые происходят в этих телах в процессе эволюции.

Проведенные в последние десятилетия измерения содержания элементов и их изотопов (атомов с одинаковыми зарядами ядер, но с различной массой, например водород и тяжелый водород, или дейтерий) дают нам мощное средство для определения происхождения планетного вещества. Теперь мы можем исключить из рассмотрения в качестве источников вещества, из которого образовались планеты, Солнце и звезды. На Земле, в атмосфере Юпитера и в межзвездном газе отношение содержаний дейтерия и водорода составляет около $2 \cdot 10^{-8}$. Дейтерий — редкий, но исключительно стабильный изотоп, распадается только при очень высоких температурах, например в недрах звезд. Измеренное отношение содержаний дейтерия и водорода в атмосфере Солнца равно $3 \cdot 10^{-7}$, или 160 от содержания в планетах и межзвездном газе. Поэтому сразу же можно исключить из рассмотрения теории, согласно которым планетная система образуется из газов, выброшенных Солнцем, проходящей звездой или при столкновении звезд. Это заключение подтверждается данными о содержании лития. Кроме того, Л. Спитцер показал, что быстрая потеря газа Солнцем или звездами должна приводить к взрывному расширению. На минимальной глубине перемешивания температура газа в звезде достигает миллиона градусов и более и обычно поддерживается там огромным гравитационным сжатием. При внезапном расширении вследствие уменьшения давления невозможны никакие процессы конденсации или сжатия, требующиеся для образования планет или планетезималей.

Некоторые теории эволюции планетной системы представляются теперь устаревшими и имеют только исторический интерес. К ним относится теория Жоржа Луи Леклерка де Бюффона (1707-1788), согласно которой Солнце испытало сильный удар массивного тела (он считал, что это была комета). Модификации этой идеи, включавшие близкое прохождение звезды около Солнца, были предложены сэром Джеймсом Хопвудом Джинсом (1877-1946) и сэром Харольдом Джеффрисом, чтобы обойти проблему момента количества движения Солнца. Последнюю попытку сделал Генри Норрис Рассел (1877-1957), который предположил, что планеты образовались из остатков разрушенной звезды-спутника Солнца. Эти теории больше неприспособлены. Тем не менее одна такая теория Т. Чемберлена (1843-1928) и Ф. Мультона (1872-1952) включает важное представление, называемое *теорией планетезималей*. Здесь газ покидает Солнце вследствие мощных притягов, вызванных проходящей звездой, и отбрасывается по спиральной траектории. Оставшаяся часть затем конденсируется в малые планетезималы, слипающиеся в конце концов в астероиды и планеты. Представление о конденсации и слипании частиц, входящее в теорию планетезималей, служит основой современных теорий, хотя происхождение протопланетного облака совершенно иное.

Итак, мы исключили Солнце и звезды в качестве источников планетного вещества, и в нашем распоряжении остаются межзвездный газ и пыль. Этот источник вещества соответствует нашим современным представлениям о звездообразовании. Тогда возникает вопрос: являются-

ся ли Солнце и планетная система ровесниками или планеты образовались вокруг Солнца из захваченного межпланетного вещества? Если бы можно было точно измерить возраст Солнца, то ответ был бы ясен, но, увы, такие измерения невозможны. Однако есть и другой ключ к решению — измеренное отношение содержаний изотопа углерода с атомной массой 12 (^{12}C) в его редкого изотопа с атомной массой 13 (^{13}C). Это отношение на Солнце, Земле, Венере, Юпитере, в метеоритах и кометах приблизительно равно 90. В Галактике отношение содержаний этих изотопов в межзвездном газе меняется в довольно широких пределах. На Солнце на современной стадии его эволюции это отношение не подвергается заметному влиянию, поскольку термоядерные реакции, в которых синтезируется углерод, довольно слабы. Если бы точность измерений отношения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ была около 1%, то мы имели бы довольно сильный аргумент в пользу общего происхождения всей Солнечной системы. К сожалению, для надежной проверки точность слишком низка.

Хотя измерения только указывают на приблизительное постоянство $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ и его нельзя считать окончательно установленным, сейчас большинство ученых отдают предпочтение общему происхождению Солнца и его планетной системы. Из теоретических расчетов следует, что изолированному Солнцу было бы трудно захватить нужное количество газа и пыли. Солнечный ветер весьма эффективно выметает крайне разреженный газ, а давление излучения препятствует выпадению мелкой межзвездной пыли на Солнце и ее накоплению вблизи него. Поэтому при движении через межзвездное облако, даже относительно плотное, Солнце создаст бы вокруг себя пустое пространство. Следовательно, Солнце просто прочтупило бы «туннель» в межзвездном облаке, подобно инверсионному следу реактивного самолета, летящего в стратосфере. Поскольку никакой убедительной теории аккумуляции протопланетной туманности вокруг изолированного Солнца все еще не предложено, ниже мы остановимся на теориях, включающих общее происхождение всей системы из сжимающегося межзвездного облака.

Межзвездным облакам не так-то легко сжаться, поскольку они обычно пронизаны электрическими токами и магнитными полями. Такие поля напряженностью около 0,0001 Гс магнитного поля обнаруживаются по наблюдениям поляризации света, рассеянного пылевыми частицами облаков. Частицы в магнитных полях ориентируются в пространстве определенным образом, что и приводит к возникновению поляризации. Иными словами, межзвездные облака газа это плазма. Магнитные поля, так же как давление газа и излучения, препятствуют сжатию. Поэтому звездообразование наблюдается вдоль ведущих границ спиральных рукавов нашей Галактики и других галактик. К. Хаяши показал, что, как только наступает неустойчивость, происходит быстрое сжатие, почти со скоростью свободного падения. Энергия сжатия идет на диссоциацию молекул водорода, а затем на ионизацию водорода и гелия — двух элементов, составляющих почти всю массу облака. После сжатия примерно до размеров современной орбиты Меркурия в течение нескольких сотен тысяч лет звезда имеет блеск, на несколько звездных

величин превышающий ее звездную величину, которой она достигает, когда в ней устанавливаются термоядерные реакции, действующие в современном Солнце. Замечательное открытие Е. Беклином, Д. Клейнманом и Ф. Лоу инфракрасных звезд убедительно продемонстрировало существование протозвездных систем в пылевых облаках в современную эпоху.

Г. Хербиг показал, что неправильные переменные звезды типа Т Тельца в плотных газо-пылевых облаках это молодые звезды, быстрыми темпами теряющие вещество. Молодые звезды, более массивные чем Солнце, теряют заметную долю своей массы в виде сильного звездного ветра, подобного солнечному ветру.

Молодые звезды, как правило, наблюдаются в областях интенсивного звездообразования; взорвавшиеся массивные звезды (*сверхновые*) изменяют отношение содержаний химических элементов. Изучение метеоритов дает прямое свидетельство того, что в Солнечной системе, вероятно, сохранились следы такого события. Дж. Рейнольдс нашел, что в некоторых метеоритах содержание изотопа ксенона-129 необычайно высоко по сравнению с другими изотопами ксенона. Единственным вероятным родительским ядром ксенона-129 является иод-129, радиоактивный изотоп с периодом полураспада 17,2 млн. лет. Поскольку ксенои, благородный газ, должен был образоваться и удерживаться в самих астероидных телах, иод-129 должен был возникнуть за несколько десятков миллионов лет до образования астероидов. Избыточное содержание магния 26 (типичное содержание 11%), найденное в оскочках некоторых метеоритов, указывает на то, что ранее присутствовали изотопы алюминия-26, период полураспада которого всего 0,7 млн. лет. Таким образом, на образование родительского тела, его разрушение и объединение фрагментов было затрачено всего несколько миллионов лет после образования атомов. Р. Клейтон нашел необычные содержания изотопов кислорода, что также свидетельствует об обогащении межзвездной среды различными атомами в результате вспышек сверхновых. Из других данных следует, что когда-то в первичном веществе содержались плутоний-244 (период полураспада 76 млн. лет) и, возможно, сверхтяжелые радиоактивные элементы. Все эти данные об изотопах подкрепляют представление о том, что наша Солнечная система была одной из многих, сформировавшихся в огромном звездном инкубаторе. Вероятно, близкий взрыв сверхновой стимулировал или даже вызвал сжатие части громадного межзвездного облака.

С помощью современных электронно-вычислительных машин решается задача о сжимающемся межзвездном облаке, которая была неразрешима старыми методами. Р. Ларсон, развивший новый метод, впервые показал как протекает процесс сжатия. Оказывается, огромные облака могут распадаться на облака меньших размеров массой порядка массы звезды и в результате обычно возникают двойные или кратные звезды. Вокруг центрального сгущения могут образовываться неустойчивые кольца. Однако ЭВМ все же не может решить задачу до конца, главным образом потому, что еще не достаточно хорошо известно, как

собственно начинается процесс сжатия и каковы параметры межзвездных облаков, в частности внутренние движения, распределение магнитных полей в них и т.п. Тем не менее эти первые расчеты подтверждают наше интуитивное представление, что главной проблемой является скорее очень быстрое вращение, или большой момент количества движения, а не очень медленное вращение в возникающей протосолнечной туманности после ее сжатия до размеров современной планетной системы. Таким образом, теоретики, объясняющие Солнечную систему, исходя из исключительного малого начального момента количества движения, вероятно, ошибаются. Более правильным будет, по-видимому, подход, включающий процессы, в результате которых система освобождается от избыточного момента количества движения. Но в любом случае достаточно медленное вращение первичного облака маловероятно.

Итак, мы практически вернулись к гипотезе, в которую ученые верили очень долго. Она была предложена великим французским математиком Пьером Симоном Лапласом (1749–1827) в конце XVIII в и несколько напоминала идею известного философа Иммануила Канта (1724–1804). Согласно этой гипотезе, вращающаяся и поэтому сплюснутая вдоль оси вращения туманность, состоящая из диффузного вещества, медленно охлаждалась и сжималась. В плоскости вращения от нее последовательно отделялись кольца вещества, конденсировавшиеся в планеты и спутники нашей современной Солнечной системы. Большая часть вещества в конце концов сжалась и образовала Солнце. Вещества в кольце между современными орбитами Марса и Юпитера оказалось недостаточно для образования планеты, и поэтому возникло много астероидов. Последовательность событий изображена на рис. 192. Момент количества движения Солнца, согласно гипотезе, должен быть больше, чем планет, но не более чем на 1/50.

В эпоху Лапласа были неизвестны расстояния и природа огромных спиральных галактик, состоящих из звезд (рис. 193), и ярких газовых туманностей, поэтому в те времена горячие газовые туманности могли рассматриваться как возможные планетные системы на ранних стадиях эволюции. Теперь мы рассматриваем темные поглощающие свет туманности как потенциальные области, в которых рождаются звезды и, возможно, планетные системы типа Солнечной. Хотя гипотеза Лапласа в предложенном им виде несостоятельна, в настоящее время она развивается с учетом новых астрофизических данных. При таком сжатии могут отделиться одно или несколько колец. Но и образование многих колец, из которых сконденсировались отдельные планеты, не представляет теоретической проблемы. Главная проблема связана с моментом количества движения.

Один из способов передачи момента количества движения от быстро вращающегося Солнца к сплюснутой протосолнечной туманности включает турбулентность или вихревые потоки. Попытку К. фон Вейцзеккера получить этот вывод теоретически иллюстрирует рис. 194. Такая концепция выглядит слишком искусственной, особенно из-за обрат-

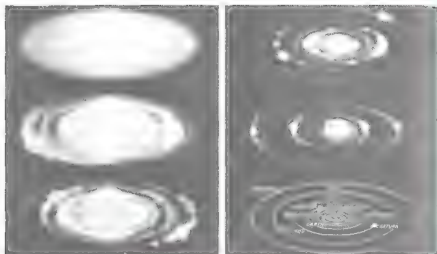


Рис. 192. Развитие протосолнечной туманности. Последовательность изображений вращающейся газовой туманности в Солнце планет и астероиды (Рисунок С. Боллеа, ФРАС)

ного вращения планетных конденсации между большими вихрями. Эта теория не может также объяснить медленного величавого вращения Солнца, наблюдаемого в современную эпоху. Тем не менее теория турбулентности, как мы увидим ниже, привлекательна в некоторых отношениях.

Другой процесс замедления вращения Солнца включает жестко связанные с высокоионизированной плазмой силовые линии магнитного поля. Такое магнитогидродинамическое рассмотрение впервые предложено шведским ученым Х. Альвеном. Магнитные силовые линии препятствуют сжатию межзвездного газового облака. Сохраняются ли они в ходе сжатия или нет — вопрос спорный, но можно ожидать, что они вновь появляются в быстро вращающейся горячей конденсации в центре протосолнечной туманности.

На Солнце существуют сильные магнитные поля, особенно в солнечных пятнах. Радиоизлучение Солнца, мощные вспышки во время солнечных вспышек и связанные с ними космические лучи и солнечный ветер доказывают, что на Солнце мы имеем дело с горячей плазмой, в которой очень важную роль играют вмороженные в нее магнитные силовые линии. У молодых звезд, которые будут эволюционировать в звезды типа Солнца, наблюдаются сильные неправильные изменения радиоизлучения подобного характера. С конца 40-х годов стало ясно, что магнитогидродинамические процессы позволяют перераспределить момент количества движения наружу от быстро вращающейся «новорожденной» звезды, в результате чего остается медленно вращающаяся



Рис. 193

Спиральная галактика NGC 4736, сфотографированная 5-метровым телескопом-рефлектором. Такая галактика содержит массу, в миллиард раз превышающую массу всей Солнечной системы, а потому не может конденсироваться в процессе, показанном на рис 192 (Фото обсерватории Маунт-Вилсон и Маунт-Паломар.)

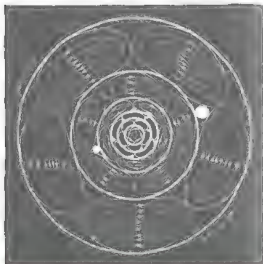


Рис 194 Вихрь юн Вильяма Гершеля. Предполагается, что и звезды сформировались из него. Точнее, разбавляясь между вихрями и вращающихся в противоположном вращению вихрей направлении (*Physics Today*, 1948)

звезда, подобная Солнцу. В 1960 г. Фред Хойл выдвинул теорию планетной эволюции с момента, когда вся протосолнечная система, сжалась примерно до размеров современной орбиты Меркурия. Затем он связал быстро вращающееся Солнце и туманность магнитными силовыми линиями, подобными в некоторых отношениях длинным упругим нитям, связывающим ионизованное вещество с протопланетным диском (рис. 195). Поскольку внешний диск вращается медленнее, нити постепенно закручиваются и натягиваются, увеличивая таким образом момент количества движения диска и замедляя вращение Солнца. К сожалению, предложенный Хойлом механизм недостаточен для переноса планетезималей во внешние области планетной системы. Тут натянутая магнитная спираль оказывает направленное наружу давление на газ, кроме того, имеется малый компонент в направлении движения газа. Следовательно, газ движется так, как будто он находится под действием меньшей силы гравитации, чем вызываемая Солнцем, и поэтому медленнее, чем планетезимали. Поэтому планетезимали эффективно тормозятся в такой среде и движутся по спирали внутрь, тогда как газ движется по спирали наружу.

Очевидно то, что в ходе эволюции Солнечной системы не могло быть сильно конденсированной конфигурации, которая расширилась и образовала протопланетную туманность, породившую планетную систему. В такой сценарии полный момент количества движения недопу-

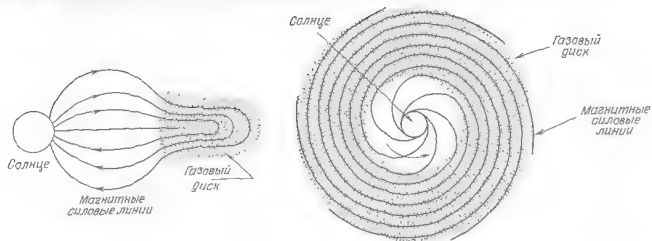


Рис. 195

Магнитные силовые линии Солнца и протопланетный диск согласно Хорту. С левой стороны стрелками отмечены направления вращения поперек плоскости экватора. Левая сторона — атмосфера — не показана. С правой — вид perpendicularно плоскости экватора показаные, закручивание силовых магнитных силовых линий в вращающемся протопланетном облаке.

етимо мал. Итак, наиболее приемлемым остается некоторый сильно видоизмененный вариант теории Канта Лапласа.

В предыдущей главе мы установили, что минимальное количество вещества с солнечным химическим составом, из которого могли сформироваться планеты земной группы, должно составлять 200-250 масс их современного скального компонента. Отсюда следует, что на образование Земли необходимо количество «сырья», примерно равное массе Юпитера А в создании всех планет земной группы и астероидов, вероятно, участвовало еще в три раза больше вещества, или 0,003 массы Солнца. Для ледяного и скального компонентов и кометного компонента соответствующий коэффициент равен 50. Каждая из планет-гигантов содержит около 15 земных масс скального компонента вдобавок к минимальной исходной массе, вероятно, 0,01-0,02 массы Солнца. Требования для комет совершенно неопределенны и меняются от 1 до 100 масс Земли с коэффициентом 50, или от 0,0002 до 0,02 массы Солнца. В целом минимальная исходная масса, участвовавшая в образовании планет и других объектов, может составлять от 0,02 до 0,04 современной массы Солнца, если пренебречь потерей массы молодым Солнцем вследствие сильного солнечного ветра, что составляет, вероятно, еще 0,05-0,1. На образование планетной системы из минимальной исходной массы потребовалось бы чрезвычайно много времени для аккумуляции, поэтому В. С. Сафронов и Б. Ю. Левин в качестве вероятной первоначальной массы полной системы выбрали 1,2 солнечной массы.

Согласно А. Камерону, исходная вращающаяся и сжимающаяся система содержала две или более солнечные массы, причем около половины было потеряно. Другая особенность его теории состоит в том, что в пределах массивной протяженной дискообразной туманности образуется много протопланет массой, равной массе Юпитера и размерами порядка астрономической единицы. Размеры протопланет так велики, поскольку они растут одновременно с Солнцем. Сначала центральная масса мала и слабо концентрируется к центру. По мере аккреции межзвездного вещества за 30-50 тыс. лет масса и размеры достигают максимума. Кометы образуются во внешних областях на расстояниях нескольких сотен или тысяч астрономических единиц от центра.

Формирование планет и рассеяние протосолнечной туманности, согласно Камерону, происходит очень быстро, через 100 000 лет после сжатия облака примерно до десятикратных размеров современной планетной системы. Перенос массы туманности наружу из растущей внутренней солнечной области центрального сгущения происходит посредством очень сильной конвективной турбулентности в туманности. Красивую теорию такого турбулентного механизма разработали Д. Линден Белл и Дж. Прингл. Когда масса вследствие турбулентности быстро перемещается наружу, она уносит избыток момента количества движения, причем некоторое количество вещества падает обратно на Солнце. В фазе Хаяши, или в фазе сильного солнечного ветра, завершается удаление остатков разреженной туманности.

Из-за быстрых темпов потери массы далекие кометы внезапно

оказываются в значительно ослабленном центральном гравитационном поле и переходят на сильно вытянутые орбиты с расстоянием в афелии, равном десяткам тысяч астрономических единиц. Там, как предположил в 1950 г. Ян Оорт, они и остаются в условиях глубокого холода, причем в плоскости их орбит испытывают возмущения со стороны проходящих звезд, и изредка некоторые из них приближаются к Солнцу.

Теория Камерона содержит много новых физических приложений, слишком сложных для описания здесь Протопланеты большей частью неустойчивы, в частности относительно столкновений, из-за своих больших размеров. В случае планет земной группы эта неустойчивость в значительной степени обусловлена гравитационными силами самой туманности и Солнца. Ядра протопланет, которые в конце концов остаются после многочисленных катастроф, имеют высокую температуру, приобретенную от диссипирующей туманности. Небольшие осколки быстро охлаждаются. Эти тела, состоящие из скального вещества, испытывают многочисленные столкновения, пока сохранившиеся тела и фрагменты не образуют систему объектов, расположенных, в определенном порядке. Планеты земной группы потеряли свои первичные атмосферы, а затем приобрели современные атмосферы за счет дегазации из недр и падения малых тел, включая кометы, на их поверхность. Температура в туманности падала с расстоянием от Солнца, что подтверждается данными для метеоритов, планет и комет. Твердые межзвездные частицы могли сохраниться в пределах орбиты Венеры.

Поскольку теория Камерона непрерывно развивается, мы не будем останавливаться на ее современном варианте. Некоторое недоверие вызывает короткое характерное время, на порядок с лишним меньшее, чем в других теориях. Однако, как отмечалось выше, данные измерений содержания изотопов и уровня радиоактивности не дают сведений о временах меньше нескольких миллионов лет. Концепция больших протопланет, впервые предложенная Койпером, несомненно, должна играть важную роль во всех теориях.

Процессы аккреции и аккумуляции в протосолнечной туманности были во многом уточнены, а характерное время заметно уменьшено в теории, развитой П. Голдтрейхом и У. Уордом. Они исходят из обычных представлений. В сплюснутой вращением туманности аккреция твердых частиц будет начинаться с роста пылевых частиц, вероятно, мелких межзвездных пылинок скального или кометного компонента в зависимости от температуры. По мере роста пылинок путем конденсации газа и сгущения они будут падать к экваториальной плоскости туманности. Газ будет тормозить движение пылинок, так что они будут сталкиваться при меньших скоростях и отклоняться на меньшие расстояния от экваториальной плоскости при орбитальном движении. Довольно быстро образуется пылевой слой, очень тонкий по сравнению с толщиной газовой туманности, которая поддерживается благодаря относительно высоким тепловым скоростям атомов и молекул (рис. 196). Голдтрейх и Уорд показали, что вследствие гравитационной неустойчивости в пылевом слое частицы будут слипаться гораздо быстрее, чем

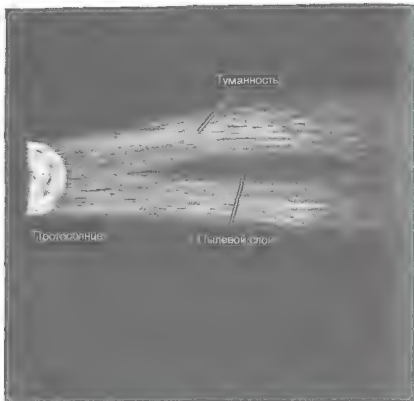


Рис. 196

Слой мелких частиц, сконденсировавшихся в экваториальной плоскости, вращающейся сплюснутый протодиск излучной туманности (По рисунку Дж. Сингареллы.)

при медленных столкновениях. Таким образом, время аккумуляции крупных тел сильно уменьшается.

Теперь мы установили основу современной теории планетезималей. Хотя до сих пор не существует теории, разработанной достаточно подробно, и все теории могут быть ошибочны в своей основе, в настоящее время наиболее популярна следующая последовательность.

Вследствие сжатия части огромного межзвездного газа-пылевого облака, весьма вероятно стимулированного близкой вспышкой сверхновой, около растущего центрального Солнца развивается уплощенная вращающаяся протопланетная туманность. Затем образуются две или, возможно, несколько больших протопланет, которые в конечном счете порождают Юпитер и Сатурн. В уплощенной туманности с высокой концентрацией вещества по сравнению с межзвездным облаком пыли-

ки служат ядрами конденсации и роста. В пределах орбиты протоплутера, где температура поднялась, пылинки могут потерять весьма летучий ледяной компонент, но дальше протосатурна они существенно не нагреваются. Кометные тела, формирующиеся в этих внешних областях путем аккреции, падают к плоскости туманности и в конце концов собираются в тонкий слой под действием гравитационного притяжения. Возможно, для аккумуляции таких «кометозималий» служили меньшие протопланеты такого же химического состава, как сама туманность. Плутон и Тритон, возможно, подобны большим кометам. Практически нельзя сделать никаких оценок числа промежуточных тел, которые росли, сталкивались друг с другом или поглощались более крупными телами.

Современные кометы образовались во внешней области и были выброшены на сильно вытянутые орбиты вследствие возмущений, прежде всего вызванных Ураном и Нептуном, некоторые образовались позже под влиянием Сатурна и Юпитера и, наконец, под действием проходящих звезд. Они также могли быть выброшены механизмом Камерона. Очевидно, они образовались много дальше от Солнца в меньших межзвездных облаках, гравитационно связанных с Солнечной системой.

Вблизи протосолнца температура была достаточно высока для расплавления большей части вещества. Ответ на вопрос, аккумуляровался ли Меркурий из частиц железистых силикатов или является остатком ядра большой протопланеты, предстоит искать в будущих исследованиях. Между Солнцем и Юпитером росли, скапливались и сталкивались, как в водовороте, многочисленные планетезимали. Много информации о давних временах приносят метеориты. Все они фрагменты тел размерами с астероиды. Большинство этих фрагментов образовались из меньших фрагментов более ранних тел, раздробленных при столкновениях. Туманность была пронизана сильными магнитными полями. Крошечные обломки облучались высокоэнергичными частицами, испускавшимися молодым Солнцем. Некоторые участки поверхности метеоритов испытали по оценкам до миллиарда ударов на квадратный миллиметр. Некоторые фрагменты состоят из тугоплавкого вещества, некогда подвергшегося плавлению в недрах тел при высоких температурах. Они часто смешаны в твердых метеоритах, состоящих из образовавшихся при низких температурах относительно летучих веществ, углистых хондригов. Многие метеориты содержат включения — хондры — стеклянные круглые или овальные образования до миллиметра диаметром. Эти хондры были когда-то жидкими каплями, которые быстро охладились, а потом собрались в большие тела. По данным радиоактивной датировки эти бурные процессы происходили главным образом в первые 200 млн. лет, до начала мощной метеоритной бомбардировки Луны.

Некоторые метеориты содержат необычные летучие вещества, которые попали в них из межзвездной среды. Поэтому возможно, что часть исходного вещества не нагревалась в области между Юпитером и Солнцем. Это свидетельствует о том, что не все вещество прошло че-

рез большие протопланеты. С другой стороны, Дж. Вассербург и его коллеги из Калифорнийского технологического института показали, что в некоторых очень маленьких фрагментах или включениях в метеорит существует избыток изотопа магний-26. Единственным приемлемым источником его является изотоп алюминий-26, период полураспада которого равен всего 740 000 лет. Алюминий, должно быть, попал в медвеждинную среду при взрыве сверхновой и вошел в состав крупных астероидных тел очень быстро, менее чем примерно за 3 млн. лет. Затем тела должны были частично охладиться, разрушиться при столкновениях, и обломки снова объединиться с другими в родительское астероидное тело, от которого затем произошел метеорит. Ранний нагрев таких тел легко объясняется тем, что содержание алюминия-26 было достаточно высоким, чтобы обеспечить необходимой энергией за короткое время. Другие короткоживущие элементы, выброшенные при взрыве сверхновой, также могли участвовать в этом процессе. Для более длительного характерного времени подходящим элементом служит калий-40 (период полураспада 1,3 млрд. лет). К. Соинен указывает, что протопланету до глубины 100 км мог разогреть сильный солнечный ветер. О реальности близкой вспышки сверхновой теперь, по-видимому, можно говорить с уверенностью, хотя ее роль в инициировании или ускорении образования Солнечной системы пока остается под сомнением. Судя по метеоритам, на образование большинства астероидов потребовалось максимум 10 млн. лет, тогда как на образование Земли и Луны, вероятно, потребовалось до 100 млн. лет с неопределенностью, как указано выше, 0,1 млрд. лет.

О числе, размерах и истории столкновений планетезималей остается только гадать. Особый интерес представляет закономерность в расположении орбит планет во внутренней части Солнечной системы, отражаемая правилом Титуса-Бодя (приложение 1). Моделирование на ЭВМ для различных начальных размеров планет с учетом столкновений, гравитационных возмущений и выбросов показывает, что современное распределение планет и орбит не является случайным следствием совершенно различных начальных условий. Во всяком случае прежняя картина роста каждой планеты в пределах ее современной орбиты может оказаться неправильной. Планеты, подобно животным, по-видимому, требуют некоторой территории. Если провести некоторую аналогию с биологической эволюцией, то как эволюцию планет, так и биологическое развитие мы в основном наблюдаем и изучаем по сохранившимся видам. Мы также наблюдаем ретиктовые остатки многих исчезнувших биологических видов и немногочисленные остатки планетезималей. «Естественный отбор» среди планет благоприятствовал тем, которые росли быстрее всего вначале. Они были способны ускорять свой рост за счет поглощения более мелких тел.

Протосолнечная туманность, какова бы ни была ее масса, рассеялась довольно быстро, за время порядка миллиона лет после основной аккумуляции. Ответственны за это были и турбулентность, и магнитогидродинамические явления. Сжимаемость молодого Солнца увеличивалась,

очень резко и, вероятно, нерегулярно. Солнце потеряло заметную долю своей массы посредством сильного солнечного ветра на протяжении нескольких миллионов лет. Наконец, его светимость стабилизировалась при значении, равном, возможно, половине современного. К этому времени Солнце потеряло большую часть своего момента количества движения и замедлило вращение, так как затормозилось плазмой солнечного ветра. Такое торможение продолжается и в наше время, но идет крайне медленно.

Преобладающее прямое вращение планет не является простым и очевидным следствием вращения протосолнечной туманности. Астероиды вращаются произвольным образом, вероятно, из-за многочисленных случайных столкновений. Вращение планет и связанных с ними систем спутников большей частью прямое. Меркурий, вероятно, затормозился из-за приливного трения, вызываемого Солнцем, а Венера могла иметь быстрое обратное вращение вместе с давно потерянным спутником. Под влиянием приливного трения спутник мог покинуть систему, а планета замедлить вращение. В случае Урана последнее столкновение с телом массой около 0,1 массы планеты могло привести к сильному наклону его оси вращения. Если он обладал группой мелких спутников, плоскости их орбит могли перейти в плоскость нового экватора вследствие совместного действия возмущений, вызываемых экваториальным вздутием, и столкновений между мелкими спутниками. Подобные события должны были происходить и у других планет с развитающимися системами спутников.

Протопланеты с очень большой сферой потенциального захвата должны приобретать прямое вращение. Для малых растущих планет конечное направление вращения сильно зависит от эксцентриситета орбит планетезималей и их распределения по расстояниям от Солнца. Столкновение с относительно массивными планетезималями могло сильно повлиять на наклон их оси вращения. После того как маленькая планета в значительной степени очистит от вещества кольцо или полосу вдоль своей орбиты, она может, вероятно, вращаться довольно медленно в любом направлении. Дальнейшая аккреция происходит за счет планетезималей, находящихся на сильно вытянутых орбитах, главным образом близ края упомянутой полосы. Те из них, которые движутся по внешним по отношению к планете орбитам, будут сталкиваться с нею вблизи своего перигелия, где их скорость максимальна, а движущиеся по внутренним орбитам будут сталкиваться вблизи афелия со скоростями, меньшими скорости планеты. Если число планетезималей близ края полосы увеличивается с расстоянием от планетной орбиты как внутри, так и за ее пределами, то большее число планетезималей будет падать на дальнюю от Солнца полусферу и поэтому усиливать прямое вращение. Обращенная к Солнцу полусфера будет догонять больше внутренних планетезималей, что опять будет усиливать прямое вращение. Конечно, столкновение с очень большими планетезималями может изменить окончательный результат. Все планеты имеют заметный наклон плоскости экватора к своей орбитальной плоскости и средней пло-

скости Солнечной системы. Вопрос, почему между Марсом и Юпитером сформировались астероиды, а не крупная планета, так и не решен. Вероятно, за это ответствен Юпитер. Рано образовавшись в туманности, большая масса Юпитера возмущала соседние газ, пыль и планетезимали, так что процессы аккреции там замедлились. Возможно, вследствие возмущений протопланета, находившаяся в этой области, упала на Юпитер или была выброшена из системы или разрушена. Как только сильный солнечный ветер начал рассеивать водород и гелий из протосолнечной туманности, многие астероиды начали постепенно расплываться вследствие столкновений друг с другом, этот процесс продолжается до сих пор. Но как оценить их общее число или массу, которая могла быть и огромной, и небольшой?

Сегодня серьезно обсуждаются четыре механизма образования Луны. Наиболее очевиден следующий: много мелких спутников образовали кольца вокруг Земли. Под действием приливного трения начавший из внутренних спутников начал двигаться по спирали наружу, увеличиваясь в размерах по мере поглощения все более внешних спутников. Оставшиеся внутренние спутники покинули систему, вероятно, под действием силы, которая удалила первичную атмосферу Земли, возможно, вследствие возмущений или столкновений с обломками. Этот «очевидный» метод образования Луны не объясняет ее очень низкую среднюю плотность, химический состав Луны свидетельствует против этой теории.

Согласно второму варианту, Луна была захвачена уже сформировавшейся. Механизм захвата, разработанный Г. Герстенкорном, нельзя полностью отвергнуть. Но почему плотность Луны ниже, чем плотность других тел, образовавшихся в этой области Солнечной системы?

Третья возможность: современный вариант приливного отделения Луны от Земли, гипотеза, предложенная сэром Джорджем Дарвином. Примем, следуя Д. Уайзу, что Земля сразу после своего образования вращалась очень быстро вблизи предела устойчивости. Когда недра расплавились под действием радиоактивного разогрева, плотное железо осело к центру и образовало ядро. Полный момент количества движения при этом сохранился, но мантия стала менее плотной и содержала меньшую долю общей массы. Вследствие этого Земля стала вращаться быстрее. Поэтому атмосфера и внешние слои вблизи экватора были сброшены, чтобы обеспечить устойчивость. Вероятно, Земля сначала приобрела кеглеобразную форму и разделилась, выбросив массу с меньшего конца. Затем под влиянием приливного трения Луна заняла свое современное положение. Эта теория весьма привлекательна, поскольку Луна образуется из менее плотной оболочки Земли и одновременно удаляется первичная атмосфера. Теория тем не менее находится на грани невозможного из-за ограничений, связанных с образованием железного ядра.

В настоящее время, вероятно, наиболее общепринятой является теория столкновения по касательной планетезимали размерами с Луну с Землей. Вещество Земли и вторгшегося тела должно было аккумуля-

роваться в кольцо вокруг Земли, повторяя вышеописанный сценарий мелких спутников. При этом значительная часть вещества должна была сильно разогреться, что и объясняет отсутствие летучих веществ в лунных породах. Значительная часть вещества должна была поступить из внешних слоев Земли, что совместимо с данными, полученными по программе «Аполлон». По-видимому, моделирование с помощью ЭВМ окончательно прояснит вероятность такого решения проблемы происхождения Луны.

О происхождении других спутников Солнечной системы известно очень мало. Сейчас принято считать, что спутники, обращающиеся в том же направлении, что и их планеты, представляют собой солнечные системы в миниатюре, причем спутники образовались в дискообразных туманностях вокруг своих планет. Малые плотности внешних галилеевых спутников указывают на «перенаселение» кометами, захваченными из области Урана. Нептун, внешней области протопланетария или на достаточно сильное кратковременное падение температуры, чтобы на столь близком расстоянии от Солнца, на котором находится Юпитер, образовался ледяной компонент. Мы уже отмечаем, что внутренние спутники, Ио и Европа могли сформироваться главным образом из скального компонента или могли потерять летучие вещества в результате приливного разогрева.

Происхождение Тритона (спутника Нептуна) весьма загадочно: он обращается по близкой к планете орбите с обратным движением. Быть может, это чужак, сменивший первоначальный спутник, ставший современным Нептуном? Или он был захвачен протяженным протонептуном или при столкновении с другим большим спутником? Могло ли при столкновении образоваться кольцо, обращающееся в обратном направлении и объединившееся в Тритон? Космический полет к Нептуну, вероятно, поможет ответить на эти вопросы.

Атмосферы планет-гигантов не представляют серьезной проблемы для теории эволюции, так как мы объяснили причину высокого содержания водорода и гелия в самих планетах. Эти легкие газы легко поднимаются к поверхности, в то время как «ледяной» компонент объясняет облака, метан, аммиак и другие молекулы. Генерация тепла в недрах Юпитера, Сатурна и Нептуна позволяет судить об их внутреннем строении. Эволюция этих планет и, вероятно, Урана еще не завершена. Медленное разделение более тяжелых атомов, молекул и минералов по глубине кажется приемлемым объяснением генерации энергии и способствует пониманию физики высоких давлений и температур.

Мы уже рассматривали атмосферы Земли, Венеры и Марса. Марс, очевидно, потерял значительную часть своей вторичной атмосферы. Сильный солнечный ветер и более высокая начальная температура поверхности, вероятно, способствовали потере первичной атмосферы. Отношение содержания изотопов азот 15 и азот 14 примерно на 60% превышает значение на Земле, указывая на потерю значительной части вторичной атмосферы. Отношения содержания ксенона-129 и ксенона-132, аргона-40 и аргона-36 много больше, чем на Земле. М. Шимниц при-

писывает эти различия загрязнению Марса продуктами вспышки сверхновой, попавшими при падении метеоритов, но реальные причины не ясны.

Атмосфера Венеры содержит огромное количество углекислого газа, но мало воды. Как мы видели, земная атмосфера когда-то содержала сравнимое количество углекислого газа, однако углерод еще в древние времена перешел в карбонатные породы. Но было ли когда-нибудь на Венере столько же воды, сколько на Земле? Для объяснения отсутствия воды во вторичной атмосфере Венеры не было выдвинуто ни одного приемлемого аргумента. Возможно, более высокая температура вследствие близости к Солнцу послужила причиной более быстрой дегазации недр Венеры, чем Земли. Но почему же тогда так много углекислого газа? Более популярна парниковая теория убегания, согласно которой на Венере когда-то было так же много воды, как и на Земле. Поскольку Венера ближе к Солнцу, нижние слои атмосферы нагревались вследствие парникового эффекта гораздо сильнее, чем теперь. Вода в верхней атмосфере быстро распадалась под действием эффекта фотодиссоциации и водород уходил в космическое пространство. Кислород вошел в химические реакции с породами Венеры. Содержание кислорода в земной атмосфере приписывается деятельности живых организмов, считается, что когда-то в атмосфере практически не было кислорода, примитивные формы жизни были, по-видимому, анаэробными (На рис. 197, составленном Карлом Саганом показаны возможные температуры поверхности Земли в прошлом и будущем).

Меркурий, Марс, Луна и многие спутники мертвы, их эволюция прекратилась. Они будут просто медленно остывать, существенные изменения будут происходить только из-за случайных столкновений и изменений орбит. Через несколько млрд. лет яркость Солнца будет возрастать, а потом ослабевать. Под влиянием приливного трения Луна будет все сильнее удаляться от Земли. В конце концов длина суток станет равна месяцу и Земля всегда будет обращена к Луне одной стороной. Этот общий период будет значительно длиннее современного месяца. Затем Луна начнет медленно приближаться по спирали к Земле. Эволюция Земли и Венеры еще продолжается, однако количество радиоактивных элементов непрерывно уменьшается, а тепло радиоактивного распада излучается в космическое пространство. Через несколько миллионов лет они тоже станут холодными шарами с замерзшей атмосферой или же с ними произойдет катастрофа.

При столь кратком описании многие вопросы эволюции Солнечной системы остались нерассмотренными или упомянутыми, но исследования развиваются исключительно быстро. Прямые космические измерения в совокупности с чувствительными методами химического и изотопного анализа обеспечивают такой мощный инструмент исследований, что удастся получить ясные ответы на многие старые вопросы. Кроме того, наблюдения протозвезд также способствуют более глубокому пониманию планетной эволюции.

Не решен вопрос о числе планет, обращающихся вокруг других звезд. Сейчас отдается предпочтение представлению, согласно которому

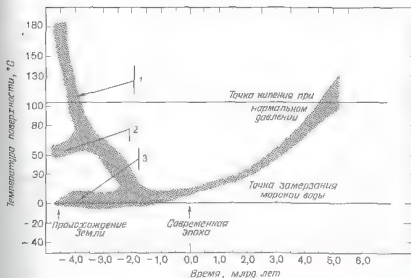


Рис 197.

Зависимость температуры земной поверхности от времени в миллиардах лет, прогноз будущего Солнечной системы. Пути эволюции, создающие условия для существования жидкой воды на поверхности Земли: 1 — эволюционный ход атмосферы при начальном давлении 1 бар H_2 ; 2 — эволюционный ход в случае равновесия аммиака и атмосферы; 3 — эволюционный ход в аммиачной атмосфере в условиях ниже равновесия (с разрывом К Сатана).

почти все звезды образуются по существу одинаково. Солнце не типично только в одном отношении — это одиночная звезда, обладающая планетной системой. По-видимому, большинство звезд образуют двойные или кратные системы. Быть может, лишь одна звезда из сотни одиночная и, следовательно, способна обладать планетной системой. В нашей Галактике 10^{11} звезд, возможно, что одна из миллиарда или из тысячи звезд может иметь планету, подобную Земле, и получающую такой же поток энергии от центрального светила. Значит, в нашей Галактике насчитывается, вероятно, от 1 до 1000 млн планет, на которых могла бы развиться разумная жизнь, а во Вселенной существуют миллионы таких галактик.

Вполне возможно, что при благоприятных условиях появляется жизнь. Однако время эволюции разума исключительно велико, о чем свидетельствуют палеонтологические данные. Человек живет на Земле менее 0,001 времени ее существования. Если цивилизация будет существовать в течение 100 млн. лет, т.е. 0,02 современного возраста Земли, то многие скептики будут посрамлены. При такой средней продолжительности существования цивилизации от 10 тыс. до 10 млн планет

в нашей Галактике должны быть населены разумными существами, более или менее похожими на нас. В настоящее время мы не можем нанести им визит из-за ограничений, накладываемых теорией относительности Эйнштейна. Мы и наши механизмы построены из атомных ядер и электронов. В ускорителях высоких энергий их можно разогнать до скоростей, близких к скорости света. Но атомные ядра и электроны не могут достичь скорости света. По мере роста энергии их скорости приближаются к критической, но при этом точно в соответствии с теорией относительности растет и их масса. Поскольку нельзя заставить мельчайшие частицы вещества двигаться быстрее света, очевидно, построенные нами механизмы также не могут двигаться со сверхсветовой скоростью.

Что касается такого же ограничения на распространение сигнала, то Г. Фейнберг указал, как можно было бы преодолеть этот барьер. Он предсказал существование элементарных частиц, *тахионов*, которые, напротив, неспособны двигаться медленнее, чем свет. Эти гипотетические частицы при ускорении теряют энергию. Существование таких частиц не противоречит теории относительности. Если бы тахионы можно было обнаружить экспериментально, а затем научиться ими управлять, то с их помощью можно было бы установить контакт с внеземными цивилизациями. Другая возможность состоит в том, что разумные существа сами попытаются вступить в контакт с нами и pošлют нам сигнал по радио или же выдадут свое существование и местонахождение, если они используют столь мощные передатчики в своей системе связи, что нашим большим радиотелескопам удастся перехватить их сигналы. Серьезная попытка обнаружить такие сигналы была предпринята в Национальной радиоастрономической обсерватории в Гриш-Бэнке, шт. Западная Виргиния, США, под кодовым названием «Проект Озма». В проекте «Циклоп» предполагается использовать решетку радиотелескопов общей площадью несколько квадратных километров. Ведутся жаркие споры о целесообразности осуществления такой программы. Разумеется, она лежит на грани фантастики и лично я настроен несколько скептически относительно ее успеха в ближайшем будущем. И все же я верю, что во Вселенной должны быть другие разумные существа. Быть может, им удалось создать менее энергоемкие средства связи, чем нам при нашем современном уровне технологического развития.

Что касается межзвездного путешествия, то из-за ограничений, связанных с энергетическими затратами и скоростями, полет человека до ближайшей звезды, находящейся на расстоянии 4,3 светового года (см. приложение 4), и обратно дело далекого будущего. Кроме того, при современном уровне технологического развития у нас нет средств для осуществления такого полета. Такая рискованная затея, хотя и выглядит фантастической, в принципе осуществима, но для этого нужны гораздо более мощные и дешевые источники энергии. Быть может, скоро станет доступна термоядерная энергия. Если бы удалось обнаружить внеземную цивилизацию или установить контакт с ней, то всеобщий интерес способствовал бы международной кооперации в исследованиях

межзвездного пространства. Ничто, как мне кажется, не могло бы стимулировать прогресс человечества в большей мере, чем такой контакт.

Мы познакомимся с современным состоянием нашей планетной системы и очень кратко с ее происхождением. Ее будущее, если не произойдет ничего непредвиденного, кажется ясным. Вероятность того, что установившийся порядок движений планет будет нарушен какой-нибудь странствующей звездой, невелика, даже в течение миллиардов лет. В ближайшем будущем не приходится ожидать сильных изменений в потоке энергии Солнца. Вероятно, могут повториться ледниковые периоды. Человек способен изменить климат, но при этом может совершить ошибку. Континенты в последующие эпохи будут подниматься и опускаться, но мы надеемся, что такие процессы будут происходить медленно. Время от времени возможны падения массивных метеоритов.

Но в основном Солнечная система будет сохранять свой современный вид.

Приложение 1

Правило Тициуса – Боде

Правило Тициуса – Боде, предложенное И. Тициусом в 1766 г. и описанное И. Боде в 1772 г., это не физический закон, а лишь удобная эмпирическая формула для приближенного определения расстояний планет от Солнца. Напишем девять четверок по одной для каждой планеты и прибавим соответственно 0 для Меркурия, 3 для Венеры, 6 для Земли, 12 для Марса, 24 для астероидов и т.д. Разделим каждую сумму на десять. Полученный ряд чисел приблизительно представляет расстояния планет от Солнца в астрономических единицах. Схематически это можно представить следующим образом.

	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Астероиды	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
	4	4	4	4	4	4	4	4	—	4
	0	3	6	12	24	48	96	192	—	384
Расстояние по правилу Тициуса – Боде	0,4	0,7	1,0	1,6	2,8	5,2	10,0	19,6	—	38,8
Истинное расстояние	0,39	0,72	1,00	1,52	—	5,20	9,54	19,18	30,07	39,67

Заметим, что правило Тициуса – Боде включает астероиды и дает расстояние до всех планет, кроме Нептуна. Лавуазье и Адамс использовали это правило для предсказания положения Нептуна, поэтому предсказанные орбиты были отягощены значительными ошибками.

Никакого теоретического объяснения этого правила не было предложено.

Приложение 2

Конфигурации планет

Различные геометрические положения планет по отношению к Солнцу называются *геометрическими конфигурациями*. Они показаны на рис. 198. Угол между планетой и Солнцем для земного наблюдателя называется *элонгацией*. Элонгация *восточная* или *западная*, орбита которой лежит за пределами орбиты Земли, меняется от 0 до 180° к западу и востоку. *Внутренняя планета*, орбита которой лежит внутри земной орбиты, может достигать только определенной максимальной элонгации *наблюдатель восточный* или *наблюдатель западный* конфигурации. Когда внутренняя планета лежит точно между Солнцем и Землей, она находится

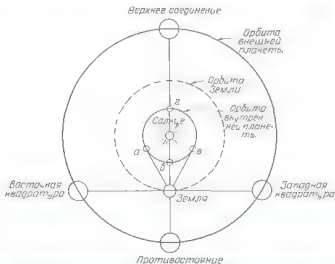


Рис. 198

близко к наблюдателю *а* наибольшая восточная элонгация, *б* нижнее соединение, *в* наибольшая западная элонгация, *г* верхнее соединение

в нижнем соединении. Если же она лежит на одной прямой с Солнцем и Землей, но по другую сторону от Солнца, то она находится в *верхнем соединении*.

Внешняя планета также может быть в *верхнем соединении* или просто в *соединении*. Когда планета находится в стороне, противоположной Солнцу, конфигурация называется *противостоянием* или *оппозицией*. Конфигурации, при которых угол между планетой и Солнцем равен 90°, называются *восточной* или *западной квадратурой*.

Внутреннюю планету лучше всего наблюдать вблизи наибольшей восточной или западной элонгации. Внешние планеты лучше всего наблюдать во время противостояний.

Приложение 3

Данные о планетах и спутниках

В следующих примечаниях поясняются данные, приведенные в табл. 6. Номер примечания соответствует номеру столбца.

1. Астрономическая единица (а.е.) — это среднее расстояние от Земли до Солнца $1 \text{ а.е.} = 149\,597\,900 \text{ км}$. Среднее расстояние от Земли до Луны составляет $384\,401 \text{ км}$, максимальное расстояние (в апогее) $406\,700 \text{ км}$, минимальное (в перигее) $356\,400 \text{ км}$.

2. Сидерический период — это продолжительность оборота относительно звезд. Тропический год (средний промежуток времени между двумя последовательными весенними равноденствиями) равен $365 \text{ сут } 5 \text{ ч } 48 \text{ мин } 46,0 \text{ с}$. Данные 2-го и 3-го столбцов приведены в тропических годах.

3. Синодический период равен времени полного оборота относительно Солнца для земного наблюдателя.

4. Определение см. на с. 34.

6 и 7. Даны средние значения. Экваториальный диаметр Земли равен $12\,756,3 \text{ км}$, полярный — $12\,713,6 \text{ км}$.

10. Масса Земли составляет $5,976 \cdot 10^{21} \text{ г}$.

12. Вес данного тела на Земле, умноженный на величину, указанную в табл. 6, дает вес тела на поверхности планеты.

13. Тело, выброшенное с этой скоростью с экватора, навсегда покинет планету (без учета атмосферного торможения).

14. Период вращения Солнца меняется от $25,0 \text{ сут}$ на его экваторе до $26,6 \text{ сут}$ на широте 35° .

18. Альбедо — это отношение отраженного планетой потока излучения к падающему на нее.

19. Наклонение экватора дается относительно орбитальной плоскости планеты (для Луны и Солнца относительно эклиптики).

Примечания к табл. 7. Номер соответствует номеру столбца.

1. Двоеточие означает, что неопределенность велика, так как диаметр оценен только по звездной величине. Звездочка указывает, что диаметр определен как кубический корень из произведения значений трех осей.

2. За единицу измерения принята масса Луны, равная $7,35 \cdot 10^{22} \text{ г}$, или $7,35 \cdot 10^{19} \text{ г}$.

3. За единицу принята плотность воды, или 1 г см^3 .

4. Измерено от центра планеты в единицах, равных 1000 км .

5. В средних солнечных сутках, равных 24 ч .

6. Наклонение i к плоскости экватора планеты. Если i больше 90° , движение обратное.

7. Первооткрыватель и год открытия.

Некоторые астрономические и физические величины

Скорость света $299\,792,5 \text{ км/с}$.

Постоянная всемирного тяготения в законе Ньютона, $F = Gm_1m_2/r^2$, $G =$

$6,670 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2)$.

Параллакс Солнца $8,7942''$.

Время, необходимое свету для прохождения 1 а.е. , $499,005 \text{ с}$.

Световой год — расстояние, проходимое светом за 1 год, $9,4605 \cdot 10^{17} \text{ см}$.

Ускорение силы тяжести на поверхности Земли на экваторе $978,031 \text{ см/с}^2$ (центробежное ускорение равно $3,392 \text{ см/с}^2$).

Скорость вращения Земли на экваторе $0,4651 \text{ км/с}$.

1 бар — атмосферное давление на поверхности Земли.

Таблица 6 Сведения о планетах

	Среднее рас- стояние от Солнца, а. е.	Сидерический период	Синодический период	Эксцентриси- те орбиты	Наклон орбиты к экватору	Орбитальная скорость, км/с	Экваториаль- ный диаметр, км	Полярное растояние	Объем (Земля = 1,0)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Меркурий	0,387	87,97 сут	1,788 су.	0,206	7,0	47,9	4878	?	0,056
Венера	0,723	224,70	583,92	0,007	3,4	35,0	12100	?	0,858
Земля	1,000	365,256	—	0,017	0,0	29,8	12756	129835	1,000
Луна	—	27,32	29,53	0,05	5,1	1,03	3477	17000	0,0203
Марс	1,524	687,0	779,9	0,093	1,8	24,1	6790	11700	0,150
Юпитер	5,203	11,86 г	1,092 г	0,048	3	13,1	142700	1154	13,3
Сатурн	9,539	29,46	1,035	0,056	2,5	9,6	120000	111	7,9
Уран	19,18	84,01	1,012	0,047	0,8	6,8	51800	1400	66
Нептун	30,06	164,8	1,006	0,009	1,8	5,4	49000	1500	58
Плутон	39,44	247,7	1,004	0,250	17,2	4,7	3000	?	0,017
Солнце	0	—	—	—	—	—	1391000	—	1300000

Тело	Масса (Земля = 1,0)	Плотность, г/см ³	Сила тяжести на поверхности (Земля = 1,0)	Скорость убе- гающего тела, км/с	Период вращения	Максималь- ная температу- ра поверхности, °C	Число спутников	Альбедо	Наклон эква- тора
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Меркурий	0,055	5,44	0,38	4,25	58,65 сут	430	0	0,056	< 30°
Венера	0,815	5,25	0,906	10,37	243	465	0	0,72	177
Земля	1,000	5,52	1,0	11,20	23 ч 56 мин	60	1	0,39	23,5
Луна	0,01229	3,34	0,165	2,37	27,3 сут	101	0	0,07	—
Марс	0,1075	3,95	0,38	5,0	24,6 ч	200	2	0,16	24,0
Юпитер	317,9	1,34	2,6	60	9,8 ч	144	14	0,70	3,1
Сатурн	95,1	0,70	1,07	35	10,2	174	11	0,75	26,7
Уран	4,6	1,23	0,88	21	16 ч	215	5	0,90	97,9
Нептун	17,2	1,64	1,14	24	16 ч	218	2	0,82	28,8
Плутон	0,0031	~ 1,0	0,05	~ 1,0	6,4	?	1?	0,25?	?
Солнце	332800	1,4	28	618	25 сут	5400	?	?	7,2

Таблица 7 Сведения о спутниках

Спутник	Диаметр км	Масса (Луна = 1)	Плотность г/см ³	Расстояние от планеты, 1000 км	Период, сут	<i>t</i>	Открытие
	1	2	3	4	5	6	7
<i>Земля</i>							
Луна	3476	1,000	3,341	384	27,322	23°	Неизвестно
<i>Марс</i>							
Фобос	22*		~ 3	9	0,319	1	Холл, 1877
Деймос	13*		~ 3	23	1,262	2	Холл, 1877
<i>Юпитер</i>							
XIV -	20:			102?	0,210 ⁹	0?	«Вояджер 1», 1979
V Амадея	346*			181	0,498	0	Барнард, 1892
I Ио	3640	1,214	3,53	422	1,769	0	Галилей, 1610
II Европа	3130	0,663	3,04	67,	3,55,	1	Галилей, 1610
III Ганимед	5280	2,027	1,93	1 070	7,155	0	Галилей, 1610
IV Каллисто	4840	1 447	1,79	1 880	16 689	0	Галилей, 1610
XIII Лета				11 100	239	27	Коулз, 1974
VI Гималия	170:			11 500	250,6	28	Перрайн, 1904
X Летиция	80			11 700	260	25	Перрайн 1905
VII Элара	26			11 900	264	29	Никольсон 1938
XII Ананке	22:			21 700	631	147	Никольсон, 1951
XI Карме	28:			22 500	692	164	Никольсон, 1938
VIII Пасифе	24:			23 500	739	145	Меллот, 1908
IX Сивоне	26:			23 700	758	153	Никольсон, 1914

Сатурн

XI	100:			152	0,70	0?	«Пионер-11», 1979
X Янус??	220:			169	0,815	0	Дольфус, 1966
I Мимас	400	0,0005	~ 1°	186	0,942	?	Гершель, 1789
II Эпимет	500:	0,00115	~ 1°	238	1,370	0	Гершель, 1789
III Тефия	1300	0,0085	~ 1°	295	2,888	1	Кассини, 1664
IV Диона	1150	0,0178	~ 1°	378	2,737	3	Кассини, 1684
V Рея	1600	0,00257	~ 1°	528	4,5,8	0	Кассини, 1672
VI Титан	5840	~ 905	1,34	1223	15,95	0	Гюйгенс, 1655
VII Гиперион	440	0,0047		1484	2,78	0	Бонд, 1848
VIII Япет	1500	0,03057	~ 1°	3563	79,33	15	Кассини, 1671
IX Феба	200:			12930	550,4	150	Пикеринг, 1898

Уран

V Миранда	400	0,00147		130	1,414	3	Коштер, 1948
I Ариэль	600	0,01777		191	7,520	0	Ласселль, 1841
II Умбриэль	250	0,00687		266	4,144	0	Ласселль, 1841
III Титания	1000	0,05857		436	8,706	0	Гершель, 1787
IV Оберон	900:	0,03547		583	13,46	0	Гершель, 1787

Нептун

I Тритон	4480	19	2°	356	5,877	160	Ласселль, 1846
II Нереида	240:			5570	359,9	28	Койпер, 1949

Плутон

Харон?	1400?	0,02?		20?	0,266?	?	Кристи, 1978
--------	-------	-------	--	-----	--------	---	--------------

Приложение 4

Звездная карта

Карта звездного неба (рис. 199) предназначена главным образом для использования вместе с табл. 9 (приложение 5) с целью определения положения и отождествления планет в любой момент 1980–1990 гг. Карта северной полярной области приведена на рис. 200.

Звездные величины звезд определяют их блеск. Чем ярче звезда, тем меньше ее звездная величина. Первая звездная величина определяется по среднему блеску двадцати самых ярких звезд неба. Звезда шестой звездной величины ровно в сто раз слабее и едва видна невооруженным глазом в очень ясную темную ночь. Каждая звездная величина представляет изменение блеска в 2,512 раза ($\sqrt[5]{100}$). Таким образом, звезда шестой величины (6^m) в 2,512 раз ярче звезды седьмой величины (7^m) и в 100 раз ярче звезды 11^m.

Звездные величины наиболее ярких звезд отрицательны. Звездная величина Сириуса, ярчайшей звезды неба, равна –1,43^m (табл. 8). Звездная величина Венеры, ярчайшей планеты, иногда достигает –4,3^m, и тогда она более чем в 100 раз ярче звезды первой величины. Звездная величина Юпитера в максимуме блеска достигает –2,5^m, Марса –2,8^m, Сатурна –0,4^m и Меркурия –1,2^m. Звездная величина Урана равна 5,7^m, т. е. теоретически Уран виден невооруженным глазом, но видеть его очень немногие. Нептун имеет звездную величину 7,6^m и легко виден в очень маленький телескоп, но обнаружить его труднее, чем Уран.

Венера, Юпитер и Марс ярче любых звезд, и поэтому их легко отождествить на небе. Нетрудно найти Сатурн, так как лишь немногие звезды превосходят его по блеску. Иногда планеты можно отождествить до постоянного свечения, звезды мерцают гораздо сильнее. Меркурий всегда так близок к Солнцу, что бесполезно даже искать его, кроме периодов наибольшихelongаций и то лишь при благоприятных условиях наблюдений.

Звездное небо разбито на созвездия, которые легко узнать по характерным группам звезд, в древние времена, в большинстве случаев названия созвездий — латинские, древнегреческие и арабские. Международный астрономический союз утвердил новые границы созвездий. Ярчайшая звезда в созвездии обозначается греческой буквой альфа (α), вторая по блеску — бета (β), третья — гамма (γ) и т. д., хотя существует много исключений. К обозначению звезды добавляется название созвездия. Многие звезды имеют также собственные названия. Названия большинства хорошо заметных созвездий приведены на карте, во многих случаях обозначены также три ярчайшие звезды α , β и γ . На карту нанесены почти все звезды до третьей звездной величины и некоторые звезды четвертой величины.

Названия некоторых самых ярких звезд даны в табл. 8.

Жирная горизонтальная линия в середине карты показывает положение небесного экватора. В США его положение на небе можно определить, если встать лицом к югу и смотреть под углом от 40 до 65° (90° минус широта места наблюдения) Синусовидальная линия, пересекающая небесный экватор, это *эклиптика*. Все планеты наблюдаются в пределах 7° от эклиптики. Широкая полоса в центре которой расположена эклиптика и которая включает все видимые пути планет, носит название пояса зодиака. Числа вдоль эклиптики дают значения эклиптической долготы, выраженной в градусах, это аналог географической долготы (В табл. 9 даны эклиптические долготы планет в различные интервалы времени с 1981 по 1992 г.). Шкала вдоль нижней границы карты — прямое восхождение измеряемое в часах, 24 ч — 360°, следовательно, 1 ч — 15°. Прямое восхождение также аналог долготы, но измеряется оно вдоль небесного экватора, а не вдоль эклиптики.

Вертикальная шкала дает *склонение*. Оно измеряется к северу (плюс) и к югу

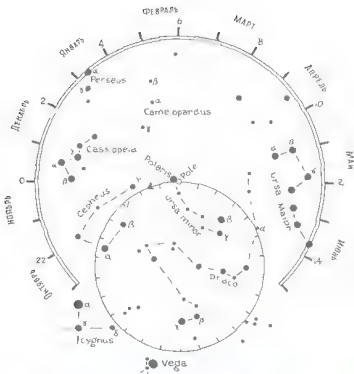


Рис. 200

Карта северных экваториальных созвездий. Поверните карту так, чтобы текущий месяц был сверху. Встаньте лицом к северу около 8 часов вечера. Маленький кружок обозначает полосу видимости призрачной. Интервал между метками равен 1000 лет. Полный оборот совершается за 26 000 лет. Через 2000 лет полярной звездой станет Вега (карта составлена J. Misk R.).

(минус) от небесного экватора. Склонение на небе аналог географической широты.

Штриховой линией обозначена средняя плоскость Млечного Пути, или Галактики.

Как пользоваться картой

Встаньте лицом к югу, держа карту перед собой.

Если время наблюдения 8 часов вечера*, то созвездия в полосе, соответствующей данному месяцу, будут видны на юге.

Если время наблюдения 10 часов вечера, ищите в следующем месяце, если 12

* Имеется в виду поясное время. Прим. ред.

часов ночи двумя месяцами позже и т.д. В 6 часов вечера ищите в полосе, соответствующей предыдущему месяцу.

Если вы живете в южном полушарии, переверните карту так, чтобы юг был сверху, и встаньте лицом к северу.

Таблица 8 Ярчайшие звезды

	Название	Визуальная звездная величина	Расстояние, световые годы
в созвездии	собственное		
α Большого Пса	Сириус	$\sim 1,43^m$	9
α Киля	Каиопус	$\sim 0,73$	500?
α Центавра *	Ригель Центавра	$\sim 0,27$	4,3
α Волопаса	Арктур	$\sim 0,06$	32
α Лиры	Вега	0,04	26
α Возничего	Капелла	0,09	45
β Ориона	Ригель	0,15	700?
α Малого Пса	Процион	0,37	11
α Эридана	Ахернар	0,53	140
β Центавра	Агеза	0,66	140
α Ориона	Бетельгейзе	(0,7)	270
α Орла	Альтаир	0,80	16
α Тельца	Альдебаран	0,85	68
α Южного Креста	Акрукс	0,87	160
α Скорпиона	Антарес	(0,98)	400
α Девы	Спика	(1,00)	230
β Близнецов	Поллукс	1,16	34
α Южной Рыбы	Фомальгаут	1,16	23
α Лебедя	Денеб	1,26	1600?
β Южного Креста	Бекрукс	1,31	470?

* Ее слабый компонент, Проксима Центавра - ближайшая к Солнцу звезда.

Названия созвездий

Латинское название	Русское название	Латинское название	Русское название
Andromeda	Андромеда	Gemini	Близнецы
Aquarius	Водолей	Grus	Журавль
Aquila	Орел	Hercules	Геркулес
Aries	Овен	Hydra	Гидра
Auriga	Возничий	Leo	Лев
Bootes	Волопас	Lepus	Заяц
Camelopardalis	Жираф	Libra	Весы
Cancer	Рак	Lupus	Волк
Canis Major	Большой Пес	Lyra	Лира
Canis Minor	Малый Пес	Ophiuchus	Змееносец
Capricornus	Козерог	Orion	Орион
Carina	Киль	Pegasus	Пегас
Cassiopeia	Кассиопея	Perseus	Персей
Centaurus	Центавр	Pisces	Рыбы
Cepheus	Цефей	Pisces Australis	Южная Рыба
Cetus	Кит	Sagittarius	Стрелец
Corona Borealis	Северная Корона	Scorpius	Скорпион
Corvus	Ворон	Taurus	Телец
Cruх	Южный Крест	Triangulum	Треугольник
Cygnus	Лебедь	Ursa Major	Большая Медведица
Delphinus	Дельфин	Ursa Minor	Малая Медведица
Draco	Дракон	Vela	Паруса
Eridanus	Эридан	Virgo	Дева

Приложение 5

Искатель планет

В табл. 9 приведены положения ярких планет с 1981 по 1992 г. Расчеты были сделаны специально для этой книги по таблицам Уильяма Д. Статмана и Оуэна Гинтеррича (*Solar and Planetary Longitudes for Years - 2500 to + 2500* *Midway* 1983), с любезного разрешения издательства Висконсинского университета. Табл. 9 предназначена для использования с звездной картой (рис. 199). В ней даны эклиптические долготы в градусах. Планеты на звездной карте располагаются вблизи эклиптики при соответствующих значениях долгот. Если цифры набраны курсивом, то планета видна в утренние часы.

Долгота Солнца дается для вечера 13 числа каждого месяца. Внешние планеты Марс, Юпитер и Сатурн трудно искать, когда они близки к Солнцу, т. е. находятся вблизи соединения, такая конфигурация отмечена двумя звездочками. Их можно наблюдать всю ночь вблизи противостояния, соответствующие значения указаны звездочками. После противостояния они видны на вечернем небе в течение около двух месяцев. Юпитер всегда находится в пределах 2° от эклиптики, Сатурн в пределах 3° и Марс в пределах 7°. Такое большое отклонение Марса наблюдается только вблизи противостояния, наиболее благоприятные противостояния указаны на рис. 147. Меркурий движется настолько быстро, что его долготы даются с десятидневным интервалом. Когда Меркурий слишком близок к Солнцу, в табл. 9 стоит прочерк. Расстояние Меркурия от Солнца в максимальных лонгациях меняется очень сильно из-за большого эксцентриситета его орбиты. Для каждой наибольшей лонгации приведено по крайней мере одно значение долготы. Когда в табл. 9 приведены значения долгот для четырех последовательных 10-дневных интервалов, есть хорошие шансы увидеть Меркурий на небе невооруженным глазом. Выберите ночь в середине серии. Когда даны одно значение или два последовательных значения, вероятность заметить Меркурий без бинокля невелика. При списках Меркурия лучше всего приблизительно подсчитать толготу на дату между приведенными значениями. Для данных толгот Меркурий всегда будет исходить в пределах 6° от эклиптики.

Долгота Венеры приводится через 15-дневные интервалы. Планета так ярка, что иногда видна очень близко к Солнцу в тату, для которых долгота не приведена, но очень недолго в вечерние или утренние сумерки. Венера может удаляться от эклиптики на 7°.

Если долготы Меркурия и Венеры не выделены курсивом, то планеты доступны наблюдениям с вечера. Если же они набраны курсивом, то их можно наблюдать только на утреннем небе.

Если вместо звездной карты, приведенной на рис. 199, вы хотите воспользоваться другой картой, нужно разделить числа табл. 9 на 15, чтобы перевести их в часы. Затем найдите прямое восхождение на карте и ищите планету около эклиптики, как и с помощью данной здесь карты.

Как искать планеты

Найдите в табл. 9 год и месяц. Возьмите число из таблицы для каждой планеты в ближайшую дату. Разделите это число на кривой, изображающей на звездной карте эклиптику, и ищите планету вблизи этой точки эклиптики. Таким же образом определяется положение Солнца.

Если в табл. 9 стоит прочерк, значит планета слишком близка к Солнцу и недоступна наблюдениям. Не ищите планету, если долгота отмечена двумя звездочками и в следующие непосредственно даты. Помните, что курсив *блид* соответствует утренней видимости. В течение двух месяцев до прохождения долгот отмеченных звездочкой, планету можно видеть вечером на востоке.

Таблица 9

Искатель планет

Дата	Солнце		Меркурий		Венера		Марс	Юпитер	Сатурн
	13	3	13	23	13	28	13	13	13
1981 г.									
Январь	293	—	—	—	272	292	313	190	190
Февраль	325	333	—	—	312	330	335	190	190
Март	353	321	326	336	346	005	358	187*	188*
Апрель	23	352	—	—	25	44	21**	183	186
Май	52	—	—	84	62	79	44	181	184
Июнь	81	93	—	—	101	119	65	181	185
Июль	111	—	90	103	138	155	87	183	186
Август	140	—	—	—	174	192	107	188	188
Сентябрь	170	180	195	207	211	228	128	194	191
Октябрь	200	213	—	—	245	262	146	200**	194**
Ноябрь	231	202	213	—	277	292	163	207	197
Декабрь	261	—	—	—	303	309	178	212	200
1982 г.									
Январь	293	—	—	—	306	298	191	217	202
Февраль	324	—	304	309	294	298	199	219	203
Март	352	316	329	—	308	320	197	220	202
Апрель	23	—	—	—	337	353	185*	218*	199*
Май	52	63	72	—	9	27	180	213	197
Июнь	82	—	—	70	45	63	187	211	197
Июль	111	81	—	—	81	99	199	211	197
Август	140	—	158	172	118	137	216	213	199
Сентябрь	170	—	195	—	157	175	236	218	202
Октябрь	200	—	—	—	194	213	256	223	205**
Ноябрь	231	—	—	—	233	251	280	231**	209
Декабрь	261	—	—	289	270	289	303	237	212
1983 г.									
Январь	293	301	—	—	309	329	328	243	214
Февраль	324	290	299	312	349	7	351	248	215
Март	352	324	—	—	23	44	13	251	215
Апрель	23	—	—	52	61	73	36	251	213*
Май	52	—	—	—	95	111	58	248*	210
Июнь	82	49	59	73	128	141	79**	244	209
Июль	110	—	—	—	152	159	100	242	209
Август	140	153	167	177	157	149	120	242	211
Сентябрь	170	180	—	—	142	146	140	244	212
Октябрь	199	—	—	—	155	170	159	248	215
Ноябрь	230	—	—	—	184	201	177	254	219**
Декабрь	261	269	281	—	217	236	194	261**	222

	Солнце				Венера		Марс	Юпитер	Сатурн
Дата	13	3	13	23	13	28	13	13	13
1984 г.									
Январь	292		272	278	255	273	211	269	225
Февраль	324	292	—	—	290	311	226	275	226
Март	353		—	—	328	347	236	280	227
Апрель	24	32	—	—	7	25	239	282	226 *
Май	53		28	36	44	62	231 *	283	223
Июнь	83	53	—	—	82	100	223	280	221
Июль	111		132	146	119	137	224	276 *	220
Август	141	157	162	—	157	175	238	273	222
Сентябрь	171	—	153	—	195	213	256	273	224
Октябрь	200	—	—	—	232	250	276	276	226
Ноябрь	231		250	263	270	288	298	281	230 **
Декабрь	262	276	—	—	305	322	321	287	233
1985 г.									
Январь	293	260	272	—	340	356	344	294 **	236
Февраль	325	—	—	—	10	19	8	302	238
Март	353		—	—	23	18	29	308	239
Апрель	23		—	8	9	6	51	313	238
Май	52	16	29	—	11	21	72	317	235 *
Июнь	82		—	—	36	51	92	317	233
Июль	111	125	137	145	67	84	112 **	315	232
Август	140	—	—	—	102	120	133	311 *	233
Сентябрь	170		—	—	138	157	152	308	234
Октябрь	200	—	—	229	176	194	171	307	237
Ноябрь	231	243	253	—	215	233	190	310	239 **
Декабрь	261	—	241	251	253	271	209	315	243
1986 г.									
Январь	293		—	—	291	310	228	321	246
Февраль	324		—	—	330	349	246	328 **	248
Март	352	—	—	—	5	24	262	336	250
Апрель	23	350	356	8	44	63	282	342	250
Май	52	23	—	—	81	99	291	348	249
Июнь	82	—	103	116	118	135	295	352	244 *
Июль	111	124	—	—	152	169	288 *	353	244
Август	140	—	—	—	186	201	282	351	244
Сентябрь	170	—	—	—	215	226	287	348 *	245
Октябрь	200	210	223	233	230	228	302	344	247
Ноябрь	231	—	—	—	220	215	322	343	250
Декабрь	261	231	—	—	221	231	342	345	253 **
1987 г.									
Январь	293		—	—	246	261	3	350	257
Февраль	324		342	—	279	296	25	356	259
Март	352		330	335	312	330	47	2 **	261
Апрель	23	346	0	—	349	7	65	11	262

	Солнце				Венера		Мерс	Юпитер	Сатурн
Дата	13	3	13	23	13	28	13	13	13
Май	52				24	43	85	17	261
Июнь	82	95	105	—	62	80	105	23	258 *
Июль	110		-	100	99	118	124	28	255
Август	140		-		137	156	144 **	30	255
Сентябрь	170		-	189	204	176	196	29	255
Октябрь	199	216	222		213	231	183	26 *	258
Ноябрь	230		212		252	271	203	21	260
Декабрь	261		—		292	307	222	20	263 **
1988 г.									
Январь	292	—		320	327	346	243	20	267
Февраль	324			314	5	22	264	25	270
Март	353	317	327	340	38	54	283	31	271
Апрель	24		-	—	70	82	304	38	273
Май	53		74	83	88	90	324	46 **	272
Июнь	82		-	—	80	73	344	53	270 *
Июль	111	81	92	—	74	82	1	59	268
Август	141		—	169	95	109	11	64	266
Сентябрь	171	185	197	205	126	142	11 *	66	266
Октябрь	200		—	—	160	178	0	66	268
Ноябрь	231		—	—	197	216	0	62 *	270
Декабрь	262		—	—	234	253	10	57	273
1989 г.									
Январь	293	-	—	—	273	292	27	56	277
Февраль	325	297	299	308	312	331	45	57	280
Март	353	319	334	—	347	6	61	60	282
Апрель	23	-	—	52	25	44	80	66	284
Май	52	64		—	63	81	99	72	284
Июнь	82		60	70	101	119	119	79 **	282
Июль	111	—		—	138	156	137	86	279 *
Август	139	147	162	177	174	192	156	92	278
Сентябрь	171	187	190	—	211	229	176	98	277
Октябрь	200		182	—	245	262	196 *	100	278
Ноябрь	231		—	—	278	291	216	101	280
Декабрь	261	—	279	291	302	308	237	98 *	283
1990 г.									
Январь	293	—		282	304	295	258	92	287 **
Февраль	324	290	302	314	292	293	281	90	291
Март	353			—	307	321	301	91	293
Апрель	23		42	—	337	353	324	94	294
Май	52	-	—	40	10	27	347	99	295
Июнь	82	49	62	-	46	63	9	105	294
Июль	110	—		140	81	99	30	112 **	292 *
Август	140	156	167	173	118	137	50	119	290
Сентябрь	170	—		-	157	176	66	126	289

	Солнце	Меркурий				Венера		Марс	Юпитер	Сатурн
Дата	13	3	13	23	13	28	13	13	13	
Октябрь	200	—	—	—	195	214	75	130	289	
Ноябрь	231	—	—	—	234	252	70*	133	290	
Декабрь	261	271	280	—	271	290	59	133	293	
1991 г.										
Январь	293	264	269	281	310	329	57	131*	297**	
Февраль	324	296	—	—	349	8	67	126	301	
Март	352	—	—	20	24	42	80	124	304	
Апрель	23	—	—	—	61	78	96	124	306	
Май	52	18	25	38	96	112	112	126	306	
Июнь	82	—	—	—	128	141	131	131	306	
Июль	110	119	134	147	151	157	148	136	305*	
Август	140	154	—	—	154	146	167	144**	302	
Сентябрь	170	—	—	—	140	145	188	151	300	
Октябрь	200	—	—	—	155	168	207	156	300	
Ноябрь	231	239	252	262	184	201	229**	161	301	
Декабрь	261	—	—	251	218	236	251	164	303	
1992 г.										
Январь	292	261	274	—	255	274	273	164	306	
Февраль	324	—	—	—	293	311	296	161	311**	
Март	353	—	—	—	329	348	318	158*	314	
Апрель	24	—	0	6	7	26	343	155	317	
Май	53	18	33	—	46	63	6	155	318	
Июнь	82	—	—	114	82	100	29	158	318	
Июль	111	127	135	—	119	137	50	162	317	
Август	141	—	—	132	158	177	71	168	314*	
Сентябрь	171	—	—	—	196	215	90	174**	312	
Октябрь	200	—	219	233	233	251	106	181	311	
Ноябрь	231	245	249	—	270	288	116	186	312	
Декабрь	262	232	241	254	305	322	116	191	314	

Венера и Юпитер ярче любых звезды. Марс может быть немного слабее Сириуса, ярчайшей звезды неба. Сатурн несколько слабее, но все же довольно ярко. Найти Меркурий очень трудно.

Прочитайте приложение 2, где описаны планетные конфигурации, и приложение 4 с описанием звездной карты.

Пример. Определим расположение планет на 5 ноября 1986 г. Из табл. 9 для ноября 1986 г. находим долготы на 13 ноября для Солнца 231°, для Меркурия 220°, для Венеры 220°, для Марса 322°, для Юпитера 343° и для Сатурна 250°. Следовательно, Меркурий и Венера слишком близки к Солнцу, причем Венера видна утром (курсив). Марс и Юпитер видны вечером и их положение благоприятно для наблюдений, соответственно на 91° и 112° к востоку от Солнца. Сатурн виден вечером довольно близко к Солнцу (в 19°).

Приложение 6

Фазы Луны

Фазы Луны измеряются от новолуния в сутках, фаза в первой четверти равна 7 сут, в полнолуние 15 сут, в третьей четверти 22 сут. Табл. 10 основана на простой приближенной формуле, данной П. Харви (*Journal of the British Astronomical Association, July, 1941*), в ней приведены фазы на нулевой день каждого месяца с января 1980 г. по декабрь 2000 г.

Как определить фазу Луны

Метод А. По табл. 10 (пригоден с 1981 по 2000 гг.).

Из таблицы берем цифру для заданного года и месяца. К ней прибавляем дату, сумма даст нам фазу на требуемую дату (Если сумма превышает 29, вычтем 30.)

Ошибка обычно около 1 сут, иногда 2 сут.

Пример. В какой фазе будет Луна 5 ноября 1986 г.?

Для ноября 1986 г. в табл. 10 находим число 28. Следовательно, фаза Луны на 5 ноября будет $28 + 5 = 33$, $33 - 30 = 3$ сут. И так, фаза Луны 3 сут, Луна видна вечером.

Примечание. Для наблюдений, которые проводятся вечером, особенно в Америке, нужно добавить 1 сут к фазе, определенной по таблице, так как даты в ней указаны для полноты в Гринвиче, Великобритания.

Метод Б. Для дат, не приведенных в табл. 10.

Формула Харви обычно дает результат с точностью до суток (иногда двух) для дат нашей эры по григорианскому календарю. Приведем вычисления для 5 ноября 1986 г.

Разделим число лет на 19; получим остаток	10
Умножим остаток на 11	110
Прибавим 13 от числа столетий, отбросим дробь	+ 6
Прибавим 14 от числа столетий, отбросим дробь	+ 4
Прибавим число 8	+ 8
Сумма	128
Вычтем число столетий	- 19
Разность	109
Прибавим число месяцев, начиная счет с марта (т.е. март 1-й месяц, февраль 12-й и январь 11-й предыдущего года)	+ 9
Прибавим день месяца	+ 5
Сумма	123
Вычтем число, кратное 30	- 120
Фаза Луны, сут.	3

Таблица 10

Фазы Луны на нулевой день каждого месяца
(январь 1981 г. декабрь 2000 г.)

Год	Ян- варь	Фев- раль	Март	Ап- рель	Май	Июнь	Июль	Ав- густ	Сев- тябрь	Ок- тябрь	Но- ябрь	Де- кабрь
1981	24	25	25	26	27	28	29	0	1	2	3	4
1982	5	6	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1983	16	17	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1984	27	28	28	29	0	1	2	3	4	5	6	7
1985	8	9	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1986	19	20	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
1987	0	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1988	11	12	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1989	22	23	23	24	25	26	27	28	29	0	1	2
1990	3	4	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1991	14	15	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1992	25	26	26	27	28	29	0	1	2	3	4	5
1993	6	7	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1994	17	18	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1995	28	29	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1996	10	11	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1997	21	22	22	23	24	25	26	27	28	29	0	1
1998	2	3	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1999	13	14	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2000	24	25	25	26	27	28	29	0	1	2	3	4

Оглавление

От редактора перевода	5
Предисловие к русскому изданию .	9
Предисловие .	10
Глава 1. Введение	12
Глава 2. Почему не разлетается Солнечная система .	29
Глава 3. Открытие Нептуна и Плутона .	42
Глава 4. Массы и размеры .	50
Глава 5. Земля	62
Глава 6. Земля как обитель жизни .	75
Глава 7. Влияние Луны на Землю	98
Глава 8. Наблюдения Луны .	112
Глава 9. Природа Луны	131
Глава 10. Плутон, Меркурий и Венера .	165
Глава 11. Марс	192
Глава 12. Юпитер и его спутники	224
Глава 13. Сатурн, Уран и Нептун .	249
Глава 14. Сравнение планет и спутников .	265
Глава 15. Происхождение и эволюция Солнечной системы .	276
Приложение 1. Правило Тициуса-Бодс	298
Приложение 2. Конфигурации планет	299
Приложение 3. Данные о планетах и спутниках и некоторые физические величины .	300
Приложение 4. Звездная карта .	304
Приложение 5. Искатель планет .	306
Приложение 6. Фазы Луны .	314

УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и др. просим присылать по адресу: 129820, Москва И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., д. 2, издательство «Мир».

Иллюстрированный журнал „В МИРЕ НАУКИ“

издается в СССР с января 1983 года.

Представляет собой перевод на русский язык американского журнала "Scientific American", издаваемого в США с 1845 года

Журнал публикует статьи о последних достижениях в области биологии, медицины, физики, астрономии, химии, математики, истории и важнейших практических приложениях этих наук.

Широко освещаются достижения в области лазерной технологии, микроэлектроники, автоматизированного проектирования, получения синтетических топлив.

Авторы статей – ведущие ученые разных стран, занимающиеся теоретическими и экспериментальными исследованиями различных проблем, представляющих всеобщий интерес.

Номер содержит восемь статей обзорного характера, в которых обобщается достигнутый уровень знаний и дается наиболее общее представление о конкретной научной или прикладной проблеме.

Каждая статья журнала – это увлекательный экскурс в лабораторию ученого или в цех современного промышленного предприятия, оснащенного передовой техникой.

Журнал рассчитан на широкий круг читателей.

Статьи написаны доступным языком, интересны по содержанию, богаты фактическим материалом и красочно иллюстрированы.

Журнал включает несколько рубрик. Помещаемые в них статьи разнообразны по тематике:

Занимательный компьютер — для любителей математических задач, игр

Наука и общество — заметки о проблемах, волнующих современное человечество

Наука вокруг нас — читатель сам может провести любопытный физический эксперимент с помощью простейших средств
50 и 100 лет назад — излагаются публикации оригинального издания прошлых выпусков

Книги — можно узнать о новых книгах, издаваемых за рубежом

Иллюстрированный журнал «В мире науки» выходит ежемесячно.

Цена одного номера 2 рубля. Подписку можно оформить на квартал, на полгода, на год. Индекс журнала 91310 по «Каталогу газет и журналов зарубежных стран», раздел «Переводные научные и научно-технические журналы».

Адрес редакции:

129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., 2,
издательство «Мир», редакция журнала «В мире науки».

Телефон: 2862588

Список опечаток

Страница	Строка	Что напечатано?	Следует читать
48	Рис. 31 1-я и 2-я сверху	слева - от 23 января 1930 г., справа - от 29 января 1930 г.	справа - от 23 января 1930 г., слева - от 29 января 1930 г.
193	Рис. 135 2-я сверху	юг вверх	юг вниз

Фред Лоуренс Уилл
СЕМЬЯ СОЛНЦА
Планеты и спутники Солнечной системы

Ст. научный редактор М. Я. Рутковская
Художник В. Н. Конохов
Художественный редактор В. И. Шаповалов
Технические редакторы Г. Б. Алюнина, И. М. Кренделев
Корректор А. Ф. Рыбальченко

ИБ № 3777
Сдано в набор 1.09.83.
Подписано к печати 25.04.84.
Формат 60 × 90^{1/16}.
Бумага офсетная № 1.
Гарнитура тайме. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 20,0. Усл. кр.-отт. 43,3.
Уч.-изд. л. 21,9. Изд. № -27/2975.
Тираж 50000 экз. Зак. 702. Цена 1 р. 60 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР», Москва, 1-й Рижский пер., 2.

Можайский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли.
143200, г. Можайск, ул. Мира, 93.